



FH MÜNSTER
University of Applied Sciences

Zukunftsfähige Wärmewende in der EUREGIO

**Masterarbeit von
Christian Käufer**

**erstellt am Fachbereich
Energie · Gebäude · Umwelt**

**Betreuender Professor:
Prof. Dr.-Ing. Christof Wetter**

**Zweitbetreuer:
Dr.-Ing. Elmar Brüggling**

Steinfurt im August 2019



FB Energie · Gebäude · Umwelt
Energy · Building Services ·
Environmental Engineering

ERKLÄRUNG DER SELBSTÄNDIGEN ANFERTIGUNG

Hiermit erkläre ich, Christian Käufler, geboren am 06.03.1992 in Wuppertal, dass die vorliegende Arbeit mit dem Titel „Zukunftsfähige Wärmewende in der EUREGIO“ von mir selbständig verfasst wurde. Es wurden keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen verwendet. Aus verwendeten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommene Stellen sind als solche gekennzeichnet. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Ochtrup, den

.2019

Unterschrift: _____

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG.....	1
2	AUSGANGSSITUATION	4
2.1	Die EUREGIO	4
2.1.1	Geschichte und Zweck	5
2.1.2	Siedlungsstruktur.....	6
2.2	Klimapolitische Ziele.....	8
2.2.1	Vereinte Nationen	8
2.2.2	Europäische Union	10
2.2.3	Deutschland.....	12
2.2.4	Niederlande	14
2.3	Energetische Ausgangssituation.....	15
2.3.1	Energetische Ausgangssituation in Deutschland.....	16
2.3.2	Energetische Ausgangssituation in den Niederlanden	20
3	NACHHALTIGE WÄRMEVERSORGUNGSSYSTEME	23
3.1	Grundlagen der Wärmeversorgung	23
3.1.1	Bereitstellung von Prozesswärme	24
3.1.2	Gebäudeenergiebedarf Wärme und Kälte	25
3.2	Formen erneuerbarer Energiequellen für Wärme	31
3.2.1	Solarthermie	32
3.2.2	Geothermie	32
3.2.3	Umgebungswärme.....	33
3.2.4	Restwärme	33
3.2.5	Biomasse und Biogas	34
3.2.6	Wasserstoff aus erneuerbaren Energien	36
3.2.7	Synthetisches Methan aus erneuerbaren Energien	36

3.2.8	Strom aus erneuerbaren Energien	36
3.2.9	Erreichbare Temperaturen aus erneuerbaren Wärmequellen	37
3.3	Technische Systeme zur regenerativen Wärmebereitstellung	38
3.3.1	Biogas-/Biomethan-Kessel und -Blockheizkraftwerk.....	41
3.3.2	Biomasse-Kessel	41
3.3.3	Wärmepumpe	43
3.3.4	Solarthermie-Anlage	45
3.3.5	Wärmenetz	46
3.4	Verbrauch, Erzeugung und Speicherung.....	47
3.4.1	Zeitlicher Verlauf des Wärmeverbrauchs	48
3.4.2	Zeitlicher Verlauf fluktuierender regenerativer Erzeugung	49
3.4.3	Speicherung.....	51
3.5	Darstellung von bestehenden Systemen und Ansätzen nachhaltiger Wärmeversorgung.....	53
3.5.1	Darstellung des Wärmeversorgungssystems in Dänemark	53
3.5.2	Ansätze erneuerbarer Energie- und Wärmeversorgungssysteme	54
3.5.3	Ansätze für nachhaltige Wärmeversorgungssysteme in Deutschland.....	56
3.5.4	Ansätze für nachhaltige Wärmeversorgungssysteme in den Niederlanden	61
3.6	Faktoren nachhaltiger Wärmeversorgungssysteme.....	66
3.6.1	Bewertungskriterien von Energiesystemen	66
3.6.2	Eingangsparameter zur Auswahl des Wärmeversorgungssystems	71
4	ERGEBNISSE.....	74
4.1	Szenarien nachhaltiger Wärmeversorgungssysteme in der EUREGIO	74
4.1.1	Zentrale, netzgebundene Systeme	74
4.1.2	Dezentrale Systeme	77
4.2	Ansatz zum Entwurf einer nachhaltigen Wärmeversorgung	78
5	DISKUSSION DER ERGEBNISSE UND AUSBLICK.....	82

5.1	Arten und Merkmale nachhaltiger Wärmeversorgungssysteme.....	82
5.1.1	Systeme mit Biomasse- oder Biogas-Wärmeerzeugern	82
5.1.2	Systeme mit zentraler Solarthermie-Anlage und Langzeit-Speicherung	84
5.1.3	Systeme mit Abwärme	84
5.1.4	Systeme mit Wärmepumpen	85
5.1.5	Systeme mit einem kalten Wärmenetz	86
5.1.6	Systeme mit Aquifer-Speichern (WKO-Systeme)	86
5.1.7	Sanierung.....	86
5.1.8	Ausbau der Wärmenetz-Infrastruktur.....	87
5.2	Vergleich und Empfehlung nachhaltiger Wärmeversorgungssysteme	88
5.3	Ausblick.....	89
6	ZUSAMMENFASSUNG	90
7	VERZEICHNISSE	92
7.1	Quellenverzeichnis	92
7.2	Abbildungsverzeichnis	112
7.3	Tabellenverzeichnis	114
7.4	Abkürzungsverzeichnis.....	115
	ANHANG	

1 EINLEITUNG

Die Reduzierung von Treibhausgas-Emissionen spielt seit der Klimarahmenkonvention (englisch *United Nations Framework Convention on Climate Change*, UNFCCC), welche 1992 in New York als völkerrechtlich verbindliche Regelung zum Klimaschutz verabschiedet wurde, sowie der im gleichen Jahr in Rio de Janeiro stattfindenden Konferenz der Vereinten Nationen über Umwelt und Entwicklung (englisch *United Nations Conference on Environment and Development*, UNCED) eine wichtige Rolle im öffentlichen Interesse. Ein Prozess der grundlegenden Veränderung der Energieversorgung in Deutschland hatte begonnen. Dieser wurde zudem ruckartig nach vorne gebracht, als die Bundesregierung nach der Nuklearkatastrophe in Japan, in Folge des schweren Erdbebens vom 11. März 2011, den Atomausstieg beschloss. (Zech 2015)

Wegweisend für die Entwicklungen in Deutschland waren das Inkrafttreten des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) am 1. April 2000 und des Erneuerbare-Energien-Wärmegesetzes (EEWärmeG) am 1. Januar 2009. (Zech 2015)

Der Weltklimarat (englisch *Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC) mahnt in seinem 2018 verabschiedeten Sonderbericht zur Begrenzung der Erderwärmung gegenüber dem vorindustriellen Niveau auf maximal 1,5 °C, um die Folgen des Klimawandels einzugrenzen. Die Länder dieser Welt einigten sich im Rahmen des Pariser Klimaabkommens bei der 21. UN-Klimakonferenz in Paris 2015 (englisch *21st Conference of the Parties*, COP 21 der UNFCCC) auf eine Grenze von maximal 2 °C Erderwärmung und bekräftigten dieses Ziel im Jahr 2018 bei der COP 24 in Katowice, wo sie zudem die Bedeutung des IPCC und seines Berichts zur Begrenzung auf 1,5 °C hervorhoben.

Diese Ziele hat die Europäische Union (EU) bei ihren Klimazielen berücksichtigt: bis 2030 sollen die EU-weiten Emissionen von Treibhausgasen (THG) um mindestens 40 % gegenüber 1990 gesenkt werden und bis 2050 um 80 bis 95 %. Die deutschen Ziele beziehen sich darauf und bis spätestens 2030 sollen die THG-Emissionen um mindestens 55 % und bis spätestens 2040 um mindestens 70 % gegenüber dem Niveau von 1990 gesenkt werden.

Werden die Ziele zur Senkung der THG-Emissionen von einem Mitgliedsstaat nicht eingehalten, steigt die Belastung des Emissionsbudget für das Folgejahr und es droht ein Vertragsverletzungsverfahren durch die Europäische Kommission (Agora Energiewende u. Agora Verkehrswende 2018). Unternehmen, die im Emissionshandelssystem nicht genug Emissionsberechtigungen abgeben können, müssen Strafzahlungen leisten (DEHSt 2019).

Auch die überwiegend erdgasverbrauchenden Niederlande haben ambitionierte Ziele, welche auch im Zusammenhang mit den Erdstößen in der Erdgasförderregion Groningen bestehen. Die Niederlande wollen erdgasfrei werden und ihre THG-Emissionen um 49 % im Jahr 2030 gegenüber 1990 reduzieren. Zudem plädieren sie für eine Anhebung der europäischen Ziele auf 55 % THG-Reduktion bis 2030.

Diese Umstellung ist im Stromsektor auf einem guten Weg. So waren 2018 in Deutschland erstmals über 40 % des verwendeten Stroms aus erneuerbaren Energiequellen. Im Wärmesektor jedoch liegt dieser Wert in Deutschland seit Jahren bei etwa 14 %.

Für die Erreichung der Klimaziele ist eine konsequente Entwicklung und Umsetzung erneuerbarer Wärmeversorgungs-lösungen erforderlich. Ein gutes Vorbild dabei kann Dänemark sein.

Diese Arbeit steht in Verbindung mit dem INTERREG-Projekt „Task Force Wärmewende“ sowie dessen Vorgänger-Projekt „Wärme in der EUREGIO – fokussieren und modernisieren (WiEfm)“ und legt daher einen räumlichen Fokus auf das Gebiet der deutsch-niederländischen Grenzregion der EUREGIO. Im Rahmen des Projekts WiEfm wurden von verschiedenen deutschen und niederländischen Ingenieurbüros Machbarkeitsstudien für Orte in diesem Gebiet erstellt und dabei eine Bandbreite an nachhaltigen Wärmeversorgungssystemen aufgezeigt und geplant. Für das Projekt Task Force Wärmewende entstand daraus die Frage, wie nachhaltige Wärmeversorgungssysteme standardisiert entworfen und verglichen werden können.

Ziel der Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Identifizierung und standardisierte Darstellung nachhaltiger Wärmeversorgungssysteme sowie der Ausblick auf ein Konzept zum standardisierten Entwurf und Vergleich von nachhaltigen Wärmeversorgungssystemen.

Dazu werden folgende Detailfragen formuliert:

- Welche nachhaltigen Wärmeversorgungssysteme gibt es?
- Was charakterisiert diese nachhaltigen Wärmeversorgungssysteme?
- Welche Eingabe-Parameter werden für eine Empfehlung und einen Vergleich benötigt?

Nach der Einleitung wird im zweiten Kapitel die Ausgangssituation erläutert. Dazu gehört ein Überblick über das betrachtete Gebiet der EUREGIO, die dort relevanten klimapolitischen Ziele sowie die energetische Ausgangssituation.

Im dritten Kapitel werden die theoretischen Grundlagen von nachhaltigen Wärmeversorgungssystemen sowie technische Systeme und Konzepte dargestellt. Dafür werden zunächst die

Anforderungen der Wärmeversorgung beschrieben, mit Fokus auf Raumwärme und Warmwasser und kurzer Betrachtung des Bereichs Prozesswärme. Dabei wird auf die verschiedenen Wärmebedarfe von Gebäuden abhängig vom Gebäudetyp und des Gebäudealters eingegangen. Anschließend wird dargestellt, welche Quellen es für erneuerbare Wärmebereitstellung gibt. Darauf folgend werden die Technologien beschrieben, um diese Wärmequellen zu nutzen. Im nächsten Punkt werden die Herausforderungen bei der Nutzung erneuerbarer Energie- bzw. Wärmequellen geschildert. Dafür wird dargestellt, wie die Bereitstellung von erneuerbarer Wärme und der Bedarf nach Wärme im zeitlichen Verlauf zueinander stehen und welche Speichertechnologien vorhanden sind, um Versorgungslücken zu überbrücken.

Im nächsten Schritt werden verschiedene Systeme und Ansätze betrachtet, die eine nachhaltige Wärmeversorgung zum Ziel haben. Hierfür soll das dänische Wärmeversorgungssystem betrachtet werden sowie die Machbarkeitsstudien des WiEfm-Projekts bezüglich nachhaltiger Wärmeversorgungskonzepte untersucht werden. Zudem sollen Strategien zur nachhaltigen Gestaltung von Wärmeversorgungssystemen beleuchtet werden.

Nun werden anhand der vorherigen Betrachtungen Aspekte und Faktoren zusammengetragen, die für eine nachhaltige Wärmeversorgung relevant sind. Die Frage, welche Eingangsparameter nötig, entscheidend und hilfreich sind, um ein nachhaltiges Wärmeversorgungssystem für ein bestimmtes, individuelles Szenario vorschlagen und vergleichen zu können, wird bearbeitet.

Im vierten Kapitel werden die Ergebnisse der Auswertung und damit standardmäßige Szenarios für Quartierskonzepte zur Wärmeversorgung dargestellt, welche zur Siedlungsstruktur der EUREGIO passen. Dies geschieht durch die Analyse der zuvor in Kapitel 3 vorgestellten Lösungen aus Dänemark und den WiEfm-Machbarkeitsstudien sowie den weiteren Konzepten.

In Kapitel 5 werden die Ergebnisse diskutiert. Damit wird ein Ausblick auf ein Konzept zum standardisierten Entwurf und Vergleich nachhaltiger Wärmeversorgungssysteme gegeben. Zudem wird eine Richtung aufgezeigt, wie die Wärmeversorgung in der EUREGIO nachhaltig gestaltet werden kann.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung.

2 AUSGANGSSITUATION

In diesem Kapitel werden die Grundlagen über die betrachtete Region der EUREGIO, die relevanten klimapolitischen Ziele und die energetische Ausgangssituation in Deutschland und den Niederlanden erläutert. Da die vorliegende Arbeit im Zusammenhang mit dem Projekt „Task Force Wärmewende – Wärme in der EUREGIO - fokussieren und modernisieren 2.0“ steht, ist das betrachtete Gebiet das der deutsch-niederländischen EUREGIO.

2.1 Die EUREGIO

In der rund 13.000 Quadratkilometer großen Grenzregion der EUREGIO leben etwa 3,4 Millionen Menschen, davon zwei Drittel auf deutscher und ein Drittel auf niederländischer Seite (EUREGIO 2011, S. 6). Abb. 2-1 zeigt das Gebiet der EUREGIO. Die EUREGIO wurde 1958 als erste Europa-Region gegründet und ist damit der älteste grenzüberschreitende Kommunalverband in Europa (EUREGIO 2011, S. 13).



Abb. 2-1: Karte der EUREGIO (EUREGIO 2016a)

Mittlerweile besteht die EUREGIO aus einem Zusammenschluss von 129 deutschen und niederländischen Städten, Gemeinden und (Land-) Kreisen, davon 25 auf niederländischer und 104

auf deutscher Seite (davon 98 Städte und Gemeinden und 6 (Land-)Kreise). In den Niederlanden sind das die Regio Achterhoek (Provinz Gelderland) sowie die Regio Twente, die Gemeinden Hardenberg und Ommen (Provinz Overijssel) und die Gemeinde Coevorden (Provinz Drenthe). Auf deutscher Seite erstreckt sich das EUREGIO-Gebiet auf Teile Niedersachsens mit dem Landkreis Grafschaft Bentheim, der Stadt Osnabrück, dem Landkreis Osnabrück und den Gemeinden Emsbüren, Salzbergen und Spelle (Landkreis Emsland) sowie Teile Nordrhein-Westfalens. Dort gehören die Stadt Münster und alle Kreise des Münsterlandes (Kreis Borken, Kreis Coesfeld, Kreis Steinfurt, Kreis Warendorf) zur EUREGIO. In Anh. 1 sind alle Gemeinden und Städte der EUREGIO aufgeführt. (EUREGIO 2019)

2.1.1 Geschichte und Zweck

Im Jahr 1958 wurde der deutsch-niederländische Zweckverband EUREGIO als erste Europa-Region gegründet. Nachdem die EUREGIO 1971 als erste grenzüberschreitende Kommission über eigene Budgethoheit verfügte und anschließend 1972 das erste grenzübergreifende und regionale Aktionsprogramm in Europa startete, folgte 1987 das Vorbild des INTERREG-Programms der Europäischen Union in Form eines Aktionsprogramms mit Maßnahmenkatalog und Finanzierungsvereinbarungen. Heutzutage gibt es zwei Förderprogramme zur Unterstützung der grenzüberschreitenden Zusammenarbeit:

1. Das EUREGIO-Mozer-Programm:

- In diesem Programm werden Bürgerbegegnungen unterstützt z. B. durch Sport- und Kulturveranstaltungen, Städtepartnerschaften, Schüleraustausche und Bildungsinitiativen.

2. Das INTERREG-Programm:

- Mit dem 1990 gestarteten INTERREG-Programm fördert die EU die Gestaltung von Grenzregionen in Europa. Das INTERREG A-Programm „Deutschland-Niederland“ aus dem Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung stellt dazu Gelder zur Verfügung, um die Schwerpunkte Wirtschaft, Technologie und Innovation, nachhaltige regionale Entwicklung sowie Integration und Gesellschaft zu fördern. Die EUREGIO hat seit dem Start des Programms die Rolle des regionalen Managements und begleitet die Projekte von der Antragstellung bis zur finanziellen Abwicklung.

Die EUREGIO will Chancen aus der Zusammenarbeit im Grenzgebiet nutzen und durch die Förderung von Verständnis für die Nachbarn den Wohlstand und das Wohlergehen für die Bürger, Unternehmen, Organisationen und angeschlossene Kommunen in der Grenzregion steigern. Die Arbeitsfelder der EUREGIO sind die folgenden:

- Sozial-kulturelle Integration
- Sozialwirtschaftliche Entwicklung
- Bürgerberatung
- Interkommunale Zusammenarbeit
- Interessenvertretung

Die Aktivitäten und Projekte in der EUREGIO sind zudem auch ein gutes Beispiel für andere Grenzregionen Europas zur grenzüberschreitenden Zusammenarbeit und unterstützen die Vision der EUREGIO eines zusammenwachsenden Europas. Dabei spielt auch der Austausch mit anderen deutsch-niederländischen Europaregionen eine Rolle. (EUREGIO 2011)

2.1.2 Siedlungsstruktur

Am 31. Dezember 2017 lag die Einwohnerzahl im EUREGIO-Gebiet bei 3,35 Millionen Einwohnern, wovon 31 % auf niederländischer Seite und 69 % auf deutscher Seite wohnen (vgl. Anh. 1).

In den Niederlanden sind die Orte in Gemeinden (niederländisch *gemeente*) gegliedert, welche die flächenmäßig kleinste Verwaltungsebene nach der Reichsobrigkeit und den Provinzen darstellt, jedoch mit den größeren Verwaltungsebenen gleichberechtigt und nicht in einer Hierarchie besteht (BZK o. J.).

Im Jahr 1900 gab es in den Niederlanden noch gut 1.200 *gemeenten*, 1958 sank diese Zahl erstmals unter 1.000 und fällt seitdem auch mit höherer Geschwindigkeit als zuvor (BZK o. J.). Seit Januar 2019 gibt es nur noch 355 *gemeenten* in den Niederlanden, Anfang 2018 waren es noch 380 (BZK 2018). Das heißt, dass in einer *gemeente* zumeist mehrere Orte zusammengeschlossen sind. Zudem besteht die Tendenz, kleinere Gemeinden zusammenzulegen. Die Zahl der *gemeenten* sinkt folglich, wohingegen ihre durchschnittliche Einwohnerzahl steigt.

In Deutschland stellen Gemeinden (auch Kommunen) die Gebietskörperschaften dar, die zumeist die kleinste Verwaltungseinheit sind. Im deutschen EUREGIO-Gebiet gibt es verschiedene Unterscheidungen und Bezeichnungen. So sind die Kriterien, ab denen eine Gemeinde als

Stadt bezeichnet wird, in Nordrhein-Westfalen anders als in Niedersachsen. In Niedersachsen gibt es zudem Samtgemeinden, die ein Zusammenschluss mehrerer Gemeinden darstellen.

Die 98 deutschen Städte und Gemeinden der EUREGIO zusammengenommen haben im Schnitt 23.581 Einwohner (Stand: 31.12.2017), wohingegen die 25 niederländischen *gemeenten* zu durchschnittlich 41.594 Einwohner haben. Ein Vergleich gestaltet sich aufgrund der unterschiedlichen Strukturen somit schwierig, soll aber dennoch vorgenommen werden. Aus Anh. 1 können die Einwohnerzahlen der einzelnen Gemeinden entnommen werden.

Ausgangspunkt dafür ist der Stadt- und Gemeindetyp des Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), welcher die (deutschen) Einheitsgemeinden und Gemeindeverbände in die Kategorien Groß-, Mittel-, Kleinstädte und Landgemeinden einordnet (BBSR o. J.). Danach gibt es folgende Aufteilungen:

- Landgemeinde: Unter 5.000 Einwohner und keine grundzentrale Funktion.
- Kleinstadt: Gemeinde eines Gemeindeverbandes oder Einheitsgemeinde mit 5.000 bis unter 20.000 Einwohnern oder mindestens grundzentraler Funktion.
 - Kleine Kleinstadt: 5.000 bis 10.000 Einwohner
 - Größere Kleinstadt: 10.000 bis 20.000 Einwohner
- Mittelstadt: Gemeinde eines Gemeindeverbandes oder Einheitsgemeinde mit 20.000 bis unter 100.000 Einwohnern. Überwiegend haben diese Städte mittelzentrale Funktion.
 - Kleine Mittelstadt: 20.000 bis 50.000 Einwohner
 - Große Mittelstadt: 50.000 bis 100.000 Einwohner
- Großstadt: Gemeinde eines Gemeindeverbandes oder Einheitsgemeinde mit mindestens 100.000 Einwohnern. Diese Städte haben meist oberzentrale Funktion, mindestens jedoch mittelzentrale.
 - kleinere Großstädte: 100.000 bis 500.000 Einwohner
 - 15 große Großstädte mit mind. 500.000 Einwohnern

Für die Städte und Gemeinden in der EUREGIO wurde in der vorliegenden Arbeit eine Unterteilung entsprechend der zuvor genannten Einwohnerzahlen vorgenommen. Es wurde jedoch auf die Begrifflichkeiten der Klein-, Mittel- und Großstadt verzichtet, da häufig mehrere Orte einer *gemeente* in den Niederlanden oder einer Samtgemeinde in Niedersachsen zugeordnet sind und die oben beschriebene Einteilung neben der Einwohnerzahl zudem die Funktion mit einbezogen wird.

In der Abb. 2-2 ist die Verteilung der Einwohner in der EUREGIO zu sehen. Somit lebt rund 36 % der Bevölkerung in der EUREGIO in Städten mit mehr als 50.000 Einwohnern. Die größte Gruppe mit rund 40 % lebt in Städten und Gemeindeverbänden mit 20.000 bis 50.000 Einwohnern. Auffällig ist hier, dass diese Gruppe in den niederländischen EUREGIO-Kommunen mit 57 % mehr als die Hälfte der Bewohner miteinbezieht, wohingegen es in deutschen EUREGIO-Kommunen 32 % sind. Dagegen leben auf der deutschen Seite mehr als 34 % in Städten und Gemeinden mit weniger als 20.000 Einwohnern, was auf niederländischer Seite mit 1,7 % praktisch nicht vorkommt. Auf die gesamte EUREGIO gesehen macht dies somit rund 24 % der Bevölkerung aus.

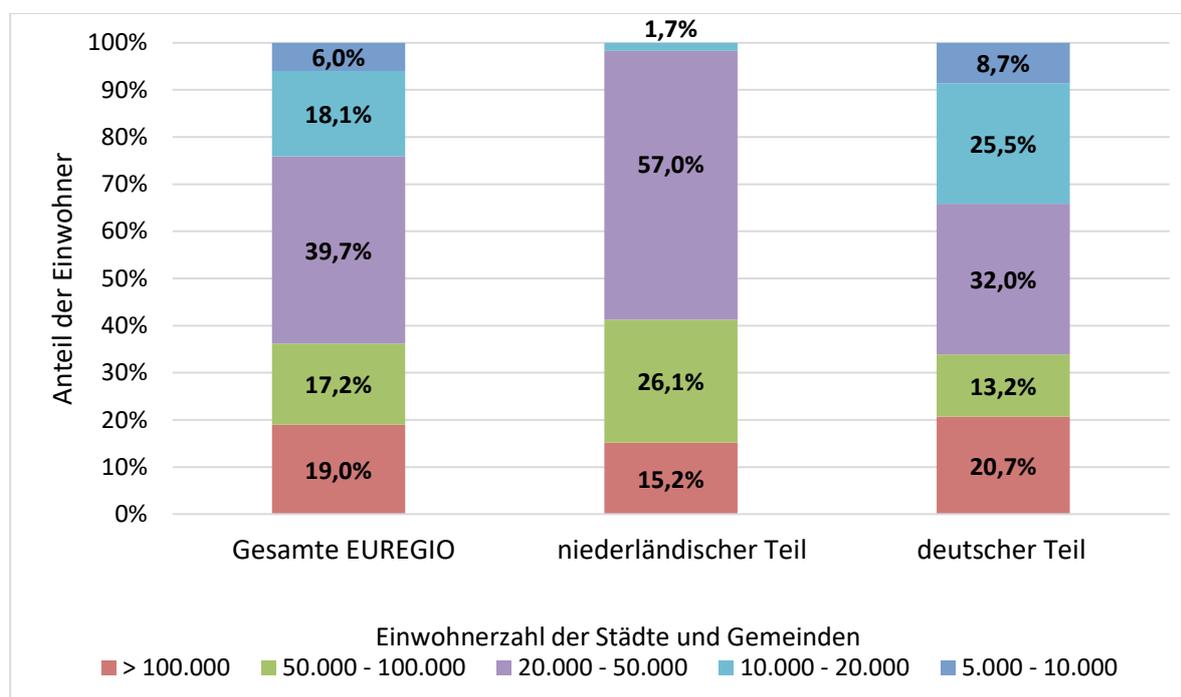


Abb. 2-2: Verteilung der Einwohnerzahlen der deutschen und niederländischen Gemeinden und Städte der EUREGIO auf die unterschiedlichen Gemeindegrößen (Stand 31.12.2017). Nach CBS (2019a) und Destatis (2019)

2.2 Klimapolitische Ziele

Nachfolgend werden die Ziele aus der internationalen, europäischen und nationalen Klimapolitik beschrieben. Dabei bauen die deutschen und niederländischen Ziele auf den europäischen Zielen auf. Diese wiederum sind von den Zielen der Vereinten Nationen beeinflusst.

2.2.1 Vereinte Nationen

Die Vereinten Nationen haben über die Klimarahmenkonvention die internationale Klimapolitik organisiert, welche derzeit von 197 Vertragsparteien mitbestimmt wird (UNFCCC 2019b).

Verabschiedet wurde sie 1992 in New York als völkerrechtlich verbindliche Regelung zum Klimaschutz und konnte auf der im gleichen Jahr in Rio de Janeiro stattfindenden Konferenz der Vereinten Nationen über Umwelt und Entwicklung unterschrieben werden. Im Juni 1993 wurde die Klimarahmenkonvention von 166 Vertragsparteien unterschrieben. (UNFCCC 2019b)

Im Rahmen der Vertragsstaatenkonferenzen der Klimarahmenkonvention (englisch *Conference of the Parties*, COP) wurden verschiedene völkerrechtlich bindende Verträge ausgearbeitet. Der erste rechtlich bindende Vertrag war das Kyoto-Protokoll. Dieses wurde auf der dritten Weltklimakonferenz 1997 in Kyoto beschlossen und ist 2005 in Kraft getreten. Es verpflichtet einen Teil der Industriestaaten dazu, ihre Treibhausgasemissionen bis 2020, um einen festgelegten Prozentwert zu reduzieren. Für die Europäische Union wurde dabei die Reduktion von sieben Treibhausgasen bis 2020 um 20 % gegenüber 1990 als ein Klimaziel festgelegt. Die Treibhausgas-Emissionen werden in CO₂-Äquivalenten gemessen. (Deutscher Bundestag 2018)

Am 12. Dezember 2015 beschloss die internationale Staatengemeinschaft der Klimarahmenkonvention – und damit nahezu alle Länder der Welt – auf der 21. Weltklimakonferenz in Paris (COP 21), dass „der Anstieg der durchschnittlichen Erdtemperatur deutlich unter 2 °C über dem vorindustriellen Niveau gehalten wird und Anstrengungen unternommen werden, um den Temperaturanstieg auf 1,5 °C über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen, da erkannt wurde, dass dies die Risiken und Auswirkungen der Klimaänderungen erheblich verringern würde“ (EU, S. 5). Das sogenannte Pariser Klimaschutzübereinkommen schließt erstmals neben allen Industriestaaten auch alle Schwellen- und Entwicklungsländer mit ein und ist somit das erste weltweit wirksame Klimaschutzabkommen und das Nachfolgeabkommen zum Kyoto-Protokoll nach 2020 (Deutscher Bundestag 2018). Die Unterzeichner bestimmen ihre nationalen Klimaziele selbst, wozu sie Selbstverpflichtungen einreichen und alle fünf Jahre erneuern. Zwischen 2050 und 2100 soll die Weltwirtschaft treibhausgasneutral werden (EU, S. 5 Art. 4 Abs. 1). Mit Stand 21.06.2019 haben 185 von 197 Vertragsparteien das Pariser Klimaschutzübereinkommen ratifiziert (UNFCCC 2019a).

Drei Jahre später hat die UNFCCC auf ihrer 24. UN-Klimakonferenz in Katowice 2018 auf die Bedeutung des Weltklimarates und dessen Sonderbericht *Global Warming of 1.5 °C* hingewiesen und ersucht sowie ermutigt die Vertragsparteien damit, die Klimaerwärmung auf 1,5 °C gegenüber der vorindustriellen Zeit zu begrenzen. (UNFCCC 2018)

2.2.2 Europäische Union

Der Europäische Rat hat im Februar 2011 für die EU das Ziel bestätigt, die Treibhausgasemissionen bis 2050 um 80 % bis 95 % gegenüber 1990 zu verringern, um das 2 °C-Ziel zu erreichen (EU 2011, S. 4).

Um die langfristigen Ziele zu erreichen, gibt es Zwischenziele. Für das Jahr 2020 sind die sogenannten 20-20-20-Ziele der EU rechtlich verbindlich. So sollen im Jahr 2020 die THG-Emissionen in der EU um 20 % gegenüber 1990 verringert sein, 20 % der Energie in der EU aus erneuerbaren Quellen stammen und die Energieeffizienz um 20 % verbessert werden. (EU-Kom 2016)

Am 24.10.2014 beschloss der Europäische Rat außerdem das verbindliche Ziel der EU die Treibhausgasemissionen bis 2030 gegenüber 1990 um mindestens 40 % zu senken. Zudem wurde für den Anteil der in der EU im Jahr 2030 eingesetzten erneuerbaren Energien und für die Verbesserung der Energieeffizienz im Jahr 2030 ein EU-Ziel von mindestens 27 % festgelegt. (EU 2014, S. 5)

Im Anschluss an das Pariser Klimaschutzabkommen und begründet durch den technologischen Fortschritt wurden diese Ziele angehoben. Bis zum Jahr 2030 soll nun der Anteil erneuerbarer Energien am Energieverbrauch auf mindestens 32 % (EU 2018b) und die Energieeffizienz auf mindestens 32,5 % steigen (EU 2018c, S. 216).

Die Reduktion der THG-Emissionen erfolgt einerseits über das Emissionshandelssystem (EHS), welches rund 45 % der europäischen THG-Emissionen abdeckt, sowie andererseits über nationale Emissionsminderungsziele, die die restlichen rund 55 % der THG-Emissionen abdecken, welche nicht im EHS erfasst sind. Das sind bspw. Emissionen aus den Wirtschaftszweigen Wohnungsbau, Landwirtschaft, Abfallwirtschaft und Verkehr (ohne Luftverkehr). Die nationalen Ziele sind durch die *Lastenverteilungsvereinbarung*¹ festgelegt und reichen für das Zieljahr 2020 abhängig vom Wohlstand der Länder von einer Verminderung um 20 % (reichste Länder) bis hin zu einer Begrenzung der Steigerung auf maximal 20 % (am wenigsten wohlhabende Länder). (EU-Kom 2016)

Im Zieljahr 2030 sollen die THG-Emissionen der EU gesamtwirtschaftlich um mindestens 40 % gegenüber 1990 reduziert sein. Dazu ist in den Sektoren, die unter das EHS fallen, eine

¹ ENTSCHEIDUNG Nr. 406/2009/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 23. April 2009 über die Anstrengungen der Mitgliedstaaten zur Reduktion ihrer Treibhausgasemissionen mit Blick auf die Erfüllung der Verpflichtungen der Gemeinschaft zur Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2020

THG-Reduktion um 43 % gegenüber dem Stand von 2005 vorgesehen und in den Nicht-EHS-Sektoren muss eine THG-Reduktion um 30 % gegenüber dem Stand von 2005 erfolgen. Für die Emissionsminderung im Nicht-EHS-Bereich sind die Mitgliedstaaten verantwortlich, weshalb diese ebenfalls über die Lastenverteilung auf die Mitgliedstaaten umgelegt wird. Die Ziele der EU-Mitglieder dafür liegen für den Zeitraum von 2020 bis 2030 bei 0 % bis - 40 % THG-Emissionsminderung gegenüber 2005, um in Summe EU-weit auf die oben genannten 30 % Minderung im Nicht-EHS-Bereich zu kommen. (EU 2018a, S. 26)

Das europäische EHS umfasst dagegen einen Großteil der Emissionen aus der Industrie mit hohem Energieverbrauch, der Energiewirtschaft und dem europäischen Flugverkehr. Über handelbare Emissionsrechte am europäischen Markt werden die Emissionen der Verursacher in diesen Bereichen, z. B. große Kraftwerke, Flugzeuge, metallverarbeitende und chemische Industrie, begrenzt. Die Betreiber müssen für ihre Emissionen entsprechende Zertifikate kaufen und jährlich nachweisen, ansonsten drohen hohe Strafen. (Agora Energiewende u. Agora Verkehrswende 2018)

Die Emissionsberechtigungen haben zudem eine Obergrenze, die festlegt, wie viel THG-Emissionen von den emissionshandlungspflichtigen Anlagen insgesamt ausgestoßen werden dürfen. In der aktuellen, dritten Handelsperiode gilt eine europaweite Emissionsobergrenze von insgesamt 15,6 Milliarden Emissionsberechtigungen, welche auf die acht Jahre (2013-2020) der Handelsperiode in der Form verteilt sind, dass jedes Jahr 38 Millionen Berechtigungen weniger zur Verfügung stehen. (UBA 2018)

Der Preis für die Emissionszertifikate liegt mit Stand 26.06.2019 bei rund 26 Euro pro Tonne Kohlenstoffdioxid-Äquivalent (CO₂Äq.) (EEX 2017).

Auch die Erhöhung der erneuerbaren Energieerzeugung wird über ein individuell für jeden EU-Mitgliedstaat festgelegtes Ziel in der *Richtlinie über Energie aus erneuerbaren Quellen*² geregelt. (EU-Kom 2016)

Die Steigerung der Energieeffizienz wird anhand des Vergleichs mit der Projektion des Energieverbrauchs im Jahr 2020 gemessen (EU-Kom o. J.). Dazu legt jeder Mitgliedstaat „ein indikatives nationales Energieeffizienzziel fest, das sich entweder auf den Primärenergie- oder den Endenergieverbrauch oder auf die Primärenergie- oder Endenergieeinsparungen oder auf die

² RICHTLINIE 2009/28/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG

Energieintensität bezieht“ (EU 2012, S. 12). Die Ziele werden als absoluter Energieverbrauchs-wert im Jahr 2020 definiert und können auch sich entsprechend auswirkende nationale Bege-benheiten berücksichtigen. (EU 2012, S. 12)

Zudem müssen die Mitgliedstaaten einen Nationalen Energieeffizienz-Aktionsplan erstellen und in einem dreijährigen Abstand aktualisiert übermitteln. (EU 2012, S. 26)

Sanktionen

Im EHS sind Strafzahlungen für Anlagenbetreiber fällig, die ihrer Pflicht zur jährlichen Abgabe von Emissionsberechtigungen in Höhe der verursachten Emissionen nicht nachkommen. Pro zu wenig abgegebener Tonne CO₂ werden 100 Euro zuzüglich des entsprechenden Anstiegs des Europäischen Verbraucherpreisindex für das jeweilige Berichtsjahr gegenüber dem Bezugsjahr 2012 fällig. Die zu wenig abgegebenen Emissionsberechtigungen müssen zudem in der folgenden Handelsperiode zusätzlich abgegeben werden. (DEHSt 2019)

Für die Einhaltung der Ziele für die TGH-Emissionen, die nicht unter das EHS fallen, sind die jeweiligen Mitgliedstaaten verantwortlich. Werden diese Ziele von einem EU-Mitglied nicht eigenständig erreicht, muss es für die Differenz zum Soll bei anderen EU-Mitgliedern über-schüssige Nicht-EHS-Emissionsrechte kaufen. Die Kosten hierfür sind noch nicht eindeutig. Alle weiteren überschüssigen Nicht-EHS-Emissionsrechte von Mitgliedern, die ihre Ziele erfüllt haben, verfallen am Ende der Handelsperiode. Wird trotz verschiedener Flexibilitäts-Optionen das zugewiesene Emissionsbudget von einem Mitgliedstaat überschritten, so werden die überzogenen Emissionen mit dem Faktor 1,08 multipliziert und sorgt im Folgejahr für eine stärkere Vorbelastung des Emissionsbudgets. Zudem droht bei nicht ausreichenden nationalen Abhilfemaßnahmen ein Vertragsverletzungsverfahren durch die Europäische Kommission. (Agora Energiewende u. Agora Verkehrswende 2018)

2.2.3 Deutschland

Die EU-Ziele für Deutschland sehen für die Reduzierung der THG-Emissionen gegenüber 2005 im Nicht-EHS-Sektor bis 2020 eine Minderung von 14 % vor (EU 2009a, S. 147) sowie bis 2030 von 38 % (EU 2018a, S. 39). Gegenüber 1990 entspräche dies einer Minderung von 32 % bis 2020 und von 51 % bis 2030. Der Anteil erneuerbarer Energie am Bruttoendenergiever-brauch in Deutschland soll laut den Zielen der EU im Jahr 2020 bei 18 % liegen (EU 2009b, S. 46). Die Ziele zur Verbesserung der Energieeffizienz sind für Deutschland unter anderem in den unten beschriebenen, angestrebten Primärenergieeinsparungen abgebildet.

Im Jahr 2007 hat die Bundesregierung sich erstmals die Minderung der Treibhausgas-Emissionen bis 2020 um mindestens 40 % gegenüber dem Jahr 1990 als nationales Ziel gesetzt. Die weiteren Zielsetzungen bis 2050 sind im „Energiekonzept 2010“ und dem im November 2016 beschlossenen „Klimaschutzplan 2050“ mit einer THG-Emissionsminderung bis 2030 um mindestens 55 %, bis 2040 um mindestens 70 % und bis 2050 um mindestens 80 bis 95 % (jeweils unter das Niveau von 1990) niedergeschrieben (Deutscher Bundestag 2018).

Die Tabelle Tab. 2-1 zeigt den THG-Ausstoß in CO₂-Äquivalenten im Basisjahr 1990, im Jahr 2014 sowie das Ziel im Jahr 2030 für die Handlungsfelder, welche in die Zieldefinition des Klimaschutzplans der Bundesregierung festgelegt wurden.

Im Gebäudebereich müssen die Treibhausgasemissionen demnach um 66 bis 67 % auf 70 bis 72 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent bis 2030 reduziert werden

Tab. 2-1: Emissionen und Emissionsziele in den Handlungsfeldern aus der Zieldefinition des Klimaschutzplans der Bundesregierung. (BMU 2016, S. 33)

Handlungsfeld	1990	2014	2030	2030
	(in Mio. Tonnen CO ₂ -Äq.)			(Minderung in % gegenüber 1990)
Energiewirtschaft	466	358	175 – 183	62 – 61 %
Gebäude	209	119	70 – 72	67 – 66 %
Verkehr	163	160	95 – 98	42 – 40 %
Industrie	283	181	140 – 143	51 – 49 %
Landwirtschaft	88	72	58 – 61	34 – 31 %
Teilsumme	1.209	890	538 – 557	56 – 54 %
Sonstige	39	12	5	87 %
Gesamtsumme	1.248	902	543 – 562	56 – 55 %

Um diese Minderungsziele zu erreichen, wurden im Energiekonzept der Bundesregierung ebenfalls Ziele zur Senkung des Primärenergieverbrauchs um 20 % bis 2020 und 50 % bis 2050 gegenüber 2008 festgelegt (BMU u. BMWi 2010). Das bedeutet eine Minderung des Primärenergieverbrauchs bis 2020 auf 11.504 PJ (- 22,8 % ggü. 1990) und bis 2050 auf 7.190 PJ (- 51,8 % ggü. 1990). Die Ziele des Energiekonzepts wurden zudem in die Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung übernommen (BReg 2018). Linear hochgerechnet auf das Jahr 2030 bedeutet das eine Einsparung von 30 % gegenüber 2008 oder 32,5 % gegenüber 1990.

Weitere Ziele sind die Steigerung des Anteils der erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch bis 2020 auf die von der EU vorgegebenen 18 % und anschließend wird eine Steigerung

auf 30 % bis 2030, 45 % bis 2040 und 60 % bis 2050 angestrebt. Deren Anteil am Wärmeverbrauch ist nur für 2020 mit 14 % festgelegt. (Deutscher Bundestag 2018)

Die Tab. 2-2 zeigt die klimapolitischen Ziele der Bundesregierung in tabellarischer Form.

Tab. 2-2: Klimapolitische Ziele der Bundesregierung. Nach Deutscher Bundestag (2018)

Kategorie	2018***	2020	2030	2040	2050
Treibhausgas-Emissionen					
Treibhausgas-Emissionen im Vergleich zu 1990	-30,8 %	min. - 40 %	min. - 55 %	min. - 70%	min. -80 bis -95 %
zulässige Emissionsmenge in Mio t CO ₂ -Äq.*	866	751	562	375	263 bis 62,5
Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien am Energieverbrauch					
Anteil am Bruttoendenergieverbrauch	16,7 %	18 %	30 %	45 %	60 %
Anteil am Bruttostromverbrauch	37,8 %	min. 35 %	min. 50 % (2025: 40 - 45 %)	min. 65 % (2035: 55 - 60 %)	min. 80 %
Anteil am Wärmeverbrauch	13,9 %	14 %	27 %**		
Reduktion des Energieverbrauchs und Steigerung der Energieeffizienz					
Primärenergieverbrauch im Vergleich zu 2008	-10,3 %	-20 %	----->		-50 %
Endenergieproduktivität	+1,15 % pro Jahr (2008 - 2017)	+ 2,1 % pro Jahr (2008 - 2050)			
Bruttostromverbrauch im Vergleich zu 2008	-1 % (2017)	-10 %	----->		-25 %
Primärenergiebedarf Gebäude im Vergleich zu 2008			----->		etwa - 80 %
Wärmebedarf Gebäude im Vergleich zu 2008	-6,9 %	-20 %			
Endenergieverbrauch Verkehr im Vergleich zu 2005	+ 4,4 % (2017)	-10 %	-15 % bis -20 %****	----->	-40 %

* basierend auf dem Wert von 1990 von 1.251 Mio. t CO₂-Äquivalenten

** nach (BMWi 2018)

*** zum Teil vorläufige Werte (UBA)

**** im Güterverkehr laut Nachhaltigkeitsstrategie (BReg 2018)

2.2.4 Niederlande

Im aktuellen Koalitionsvertrag der niederländischen Regierung hat sich diese das Ziel gesetzt, die THG-Emissionen um 49 % bis 2030 gegenüber 1990 zu reduzieren und befürwortet zugleich eine europaweite Reduzierung der THG-Emissionen um 55 %. (Wiebes 2018)

Aus den europäischen Klimaschutzzielen geht für die Niederlande hervor, dass diese ihre THG-Emissionen im Nicht-EHS-Bereich bis 2020 um 16 % (EU 2009a, S. 147) und bis 2030 um 36 % (EU 2018a, S. 39) gegenüber 2005 senken muss. Bezogen auf 1990 mit einem Ausstoß von 221,7 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalent (CLO 2019) entspricht dies einer Reduktion bis 2020 um 18,6 % und bis 2030 um 38 %.

Die langfristigen Ziele der EU, bis 2050 nahezu keine THG-Emissionen auszustoßen, sind auch für die Niederlande bei ihrer langfristigen Planung maßgeblich, weshalb hier ebenfalls von 80 % bis 95 % THG-Minderungen ausgegangen werden kann. (EZK 2016)

Der von der EU bestimmte Zielwert für den Anteil von Energie aus erneuerbaren Quellen am Bruttoendenergieverbrauch im Jahr 2020 liegt für die Niederlande bei 14 % (EU 2009b, S. 46). Aus dem niederländischen Entwurf des integrierten nationalen Energie- und Klimaplan (englisch *integrated National Energy and Climate Plan*, NECP), welcher der EU von jedem Mitgliedstaat bis zum 31.12.2018 vorgelegt werden musste (EU 2018d), geht zudem hervor, dass im Jahr 2030 die erneuerbaren Energien einen Anteil von 27 % bis 35 % am Energieverbrauch der Niederlande ausmachen sollen (Niederlande 2018, S. 24).

Des Weiteren soll, abgebildet als EU-Ziel zur Steigerung der Energieeffizienz, der Primärenergieverbrauch (ohne nichtenergetische Nutzung) bis zum Jahr 2030 auf 1.950 PJ und der Endenergieverbrauch entsprechend auf 1.864 PJ sinken (Niederlande 2018, S. 26). Für den Primärenergieverbrauch bedeutet das eine Senkung von 31,1 % gegenüber 1990 oder 40,6 % gegenüber 2008. Beim Endenergieverbrauch entspricht der angegebene Wert einer Senkung von 15,4 % gegenüber 1990 oder 26,7 % gegenüber 2008. Für 2020 gibt die Europäische Kommission in ihrem Bericht zum niederländischen NECP einen Wert von umgerechnet 2.541 PJ Primärenergieverbrauch und 2.186 PJ Endenergieverbrauch im Jahr 2020 an (EU-Kom 2019) was beim Primärenergieverbrauch etwa 10 % Senkung gegenüber 1990 bedeutet und beim Endenergieverbrauch nahezu dem Wert von 1990 entspricht.

2.3 Energetische Ausgangssituation

Zur Einhaltung der zuvor genannten klimapolitischen Ziele, die der Senkung der Treibhausgas-Emissionen dienen, sind Maßnahmen zur Senkung des Primär- und Endenergieverbrauchs nötig, welche vorrangig durch eine Effizienzsteigerung und durch die verstärkte Nutzung erneuerbarer Energiequellen erreicht werden soll.

Nachfolgend wird auf die Entwicklung von Primär- und Endenergieverbrauch, u. a. als Indikator für die Energieeffizienz, sowie auf die Nutzung erneuerbarer Energie mit Fokus auf den Bereich der Wärme in Deutschland und den Niederlanden eingegangen.

2.3.1 Energetische Ausgangssituation in Deutschland

In Deutschland ist der Primärenergieverbrauch gegenüber dem Referenzjahr 1990 bis heute durchschnittlich gesunken und lag dabei stets unter dem Wert von 1990. Im Jahr 2006 war der Primärenergieverbrauch jedoch fast wieder auf dem Niveau von 1990.

Im Jahr 2015, für das sowohl auf deutscher als auch auf niederländischer Seite zum Zeitpunkt dieser Arbeit endgültige Zahlen vorlagen, entsprach der deutsche Primärenergieverbrauch 13.262 PJ und war damit 7,8 % niedriger als im Jahr 2008, dem Referenzjahr für die Ziele der Bundesregierung bei der Primärenergieeinsparung, sowie 11,0 % niedriger als 1990.

Dabei teilte sich der Primärenergieverbrauch im Jahr 2015 auf in 79,7 % fossile Energieträger (Mineralöle, Stein- und Braunkohle sowie Gase), 6,2 % Kernenergie und 12,4 % erneuerbare Energien. Sonstige Energieträger, worunter nichterneuerbare Abfälle, Abwärme und der Außenhandelsaldo Fernwärme fallen, kamen auf 1,7 % und der Austauschsaldo Strom betrug -1,3 %.

Vom Primärenergieverbrauch sind 67,1 % und somit 8.899 PJ als Endenergie im Jahr 2015 genutzt worden. Das sind 6,1 % weniger als im Referenzjahr 1990. Insgesamt ist der Endenergieverbrauch weniger stark rückläufig und stieg auch zwischenzeitlich über den Wert von 1990.

Der Endenergieverbrauch teilte sich im Jahr 2015 auf in 66,9 % fossile Energieträger (Mineralöle, Stein- und Braunkohle sowie Gase), 20,8 % Strom (inklusive erneuerbarer Energien), 4,5 % Fernwärme und 7,0 % erneuerbare Wärme sowie 0,8 % sonstige Energieträger. Teilt man den Endenergieverbrauch von 2015 auf Sektoren auf, so entfallen 29,5 % auf den Verkehrssektor, 28,6 % auf die Industrie, 25,8 % auf Haushalte und 16,1 % auf den Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen. (AGEB 2018a; UBA u. AGEB 2018a)

Im Jahr 2018 lag der Primärenergieverbrauch bei 12.900 PJ (vorläufig) und damit 5,0 % niedriger als im Vorjahr, 10,3 % niedriger als im Jahr 2008, dem Referenzjahr für die Ziele der Bundesregierung bei der Primärenergieeinsparung, sowie 13,5 % niedriger als 1990.

Betrachtet man den Verlauf von Primär- und Endenergieverbrauch in Deutschland, so lässt sich feststellen, dass sich der Endenergieverbrauch gegenüber 1990 nicht stark verändert hat, beim

Primärenergieverbrauch jedoch ein Rückgang festzustellen ist. Daraus lässt sich ableiten, dass die Energieeffizienz sich seit 1990 gesteigert hat.

Die Abb. 2-5 zeigt den Verlauf des End- und Primärenergieverbrauchs in Deutschland für ausgewählte Jahre seit 1990, sowie deren zuvor beschriebene Aufteilung auf die verschiedenen Energieträger und Sektoren. Der Anteil erneuerbarer Energie stieg im betrachteten Zeitraum maßgeblich. So geht aus den Zahlen zu Abb. 2-5 hervor, dass 12,4 % des Primärenergieverbrauchs im Jahr 2015 aus erneuerbaren Quellen stammen, wohingegen dies 1990 nur 1,3 % waren.

In Abb. 2-3 ist zu sehen, dass der Anteil erneuerbarer Energie am Endenergieverbrauch kontinuierlich steigt – dieser liegt nach vorläufigen Zahlen im Jahr 2018 bei 16,7 % – und den Zielwert von 18 % im Jahr 2020 fast erreicht hat. Dies liegt jedoch vorwiegend an dem stark wachsenden Anteil der erneuerbaren Energien im Stromsektor, welcher im Jahr 2018 den Wert von 37,8 % erreicht hat.

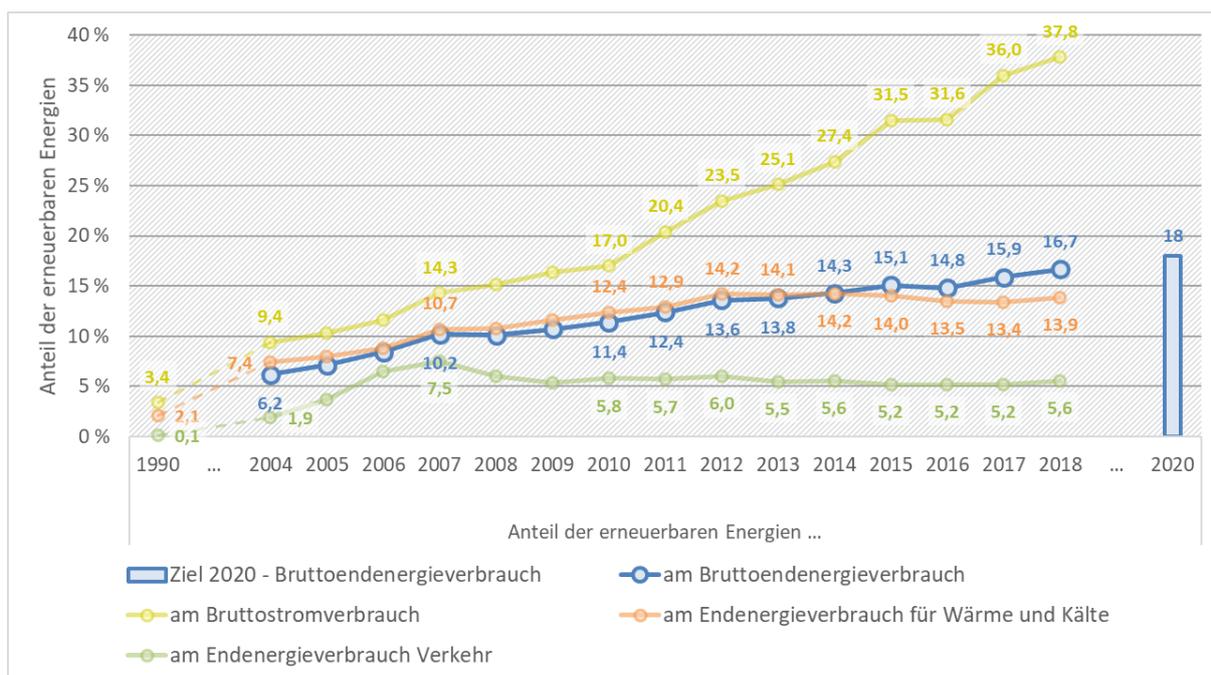


Abb. 2-3: Anteil erneuerbarer Energien am Bruttoendenergieverbrauch, am Bruttostromverbrauch, am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte sowie am Endenergieverbrauch im Verkehrssektor in Deutschland. Nach UBA (2019a, 2019b)

Im Sektor Wärme bewegt sich der Anteil erneuerbarer Energien seit 2012 auf einem gleichbleibenden Niveau von etwa 14 %. Dies entspricht der Zielvorgabe der Bundesregierung für das Jahr 2020, jedoch muss der Wert bis zum Jahr 2030 auf 27 % erhöht werden.

Zu berücksichtigen ist zudem der Anteil der Wärme am gesamten Endenergieverbrauch. In Abb. 2-4 wird deutlich, dass die Wärmeversorgung einen maßgeblichen Anteil am deutschen Endenergieverbrauch hat. So entfielen 27 % des gesamten Endenergieverbrauchs im Jahr 2017 auf die Bereitstellung von Raumwärme, weitere 5 % wurden für die Warmwasserbereitstellung benötigt und 22 % werden in sonstige Prozesswärme umgewandelt, womit die Wärme einen Anteil von über 50 % am Endenergieverbrauch hat.

Den größten Anteil an der Wärmebereitstellung in Deutschland machen nach Abb. 2-4 demnach die fossilen Brennstoffe aus, davon Erdgas mit etwa 44 % im Jahr 2017 sowie Öl mit rund 15 % und Kohle mit 9 %. Über nicht erneuerbare Fernwärme werden etwa 8 % und über Strom 12,6 % der nachgefragten Wärme bereitgestellt. Diese beiden Anteile sind insofern interessant für die erneuerbare Wärmeerzeugung, dass der Strom mit voranschreitendem Ausbau zunehmend aus erneuerbaren Quellen kommen wird und bei der Fernwärme bereits die Infrastruktur vorhanden ist.

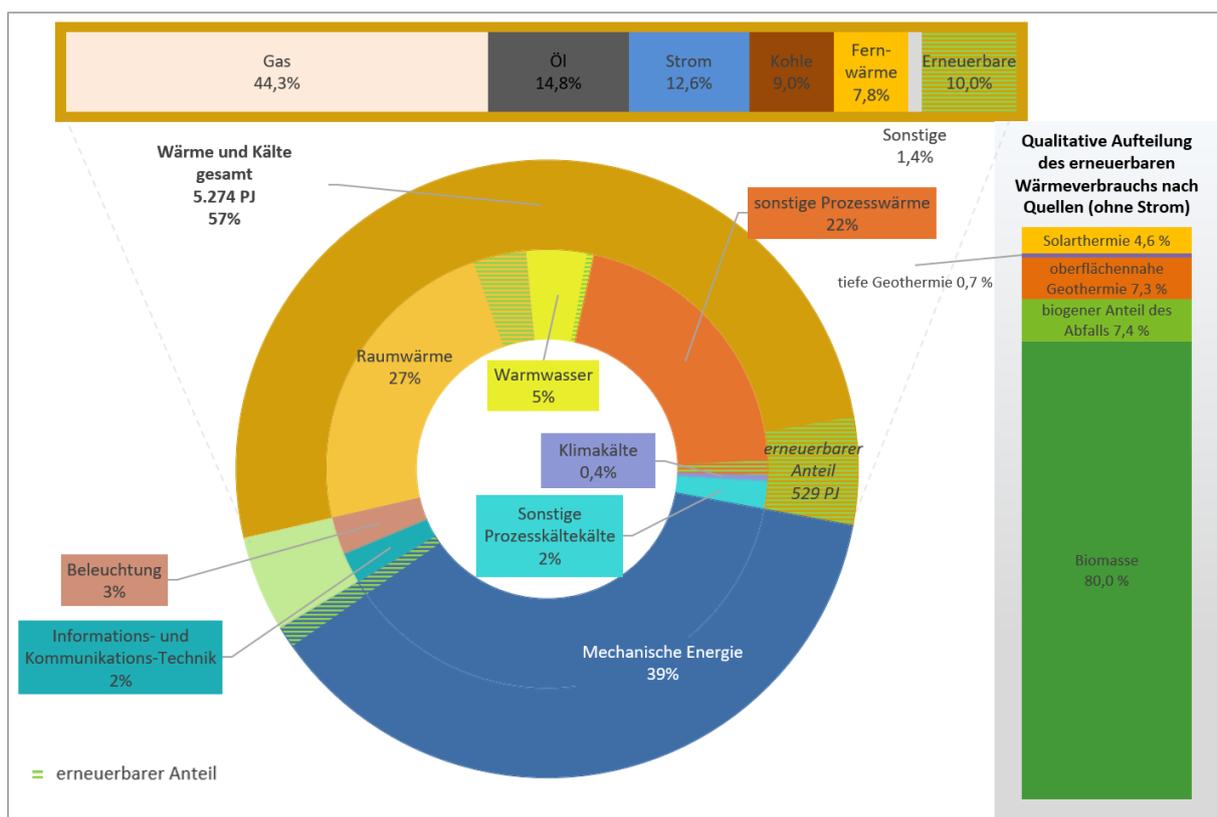


Abb. 2-4: Energieverbrauch nach Anwendungsbereichen und Energieträgern in Deutschland im Jahr 2017 (insgesamt 9.239 PJ). Nach (BMWi 2019)

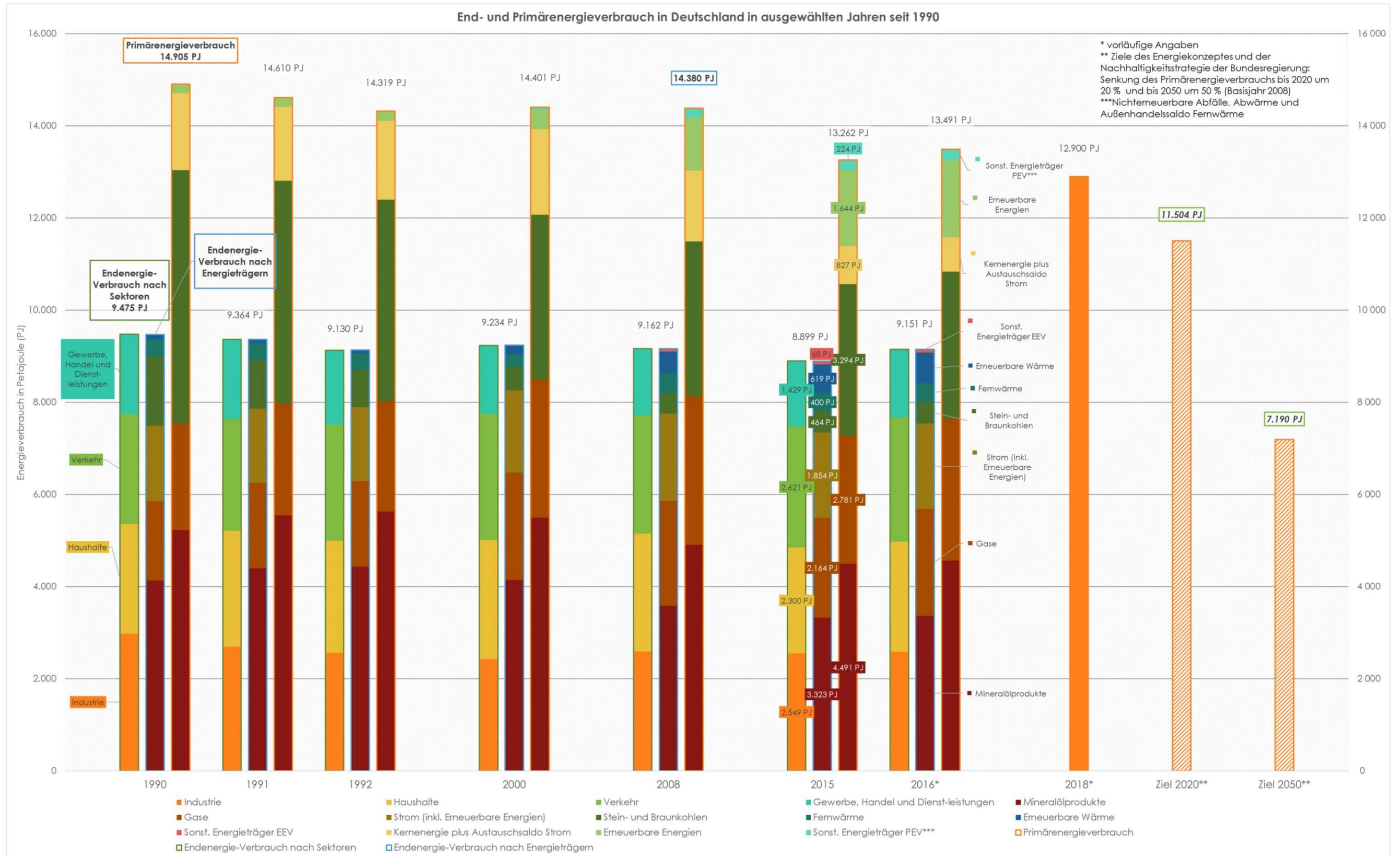


Abb. 2-5: Endenergieverbrauch (EEV) und Primärenergieverbrauch (PEV) in Deutschland in ausgewählten Jahren seit 1990. Nach (AGEB 2018a; UBA u. AGEB 2018a, 2018b)

Die erneuerbar bereitgestellte Wärme stammt zum Großteil von 80 % im Jahr 2017 aus Biomasse. Dazu kommen 7,4 % biogener Anteil des Abfalls. Mit 7,3 % folgt die oberflächennahe Geothermie und 0,7 % machen Tiefengeothermie aus. Die Solarthermie trägt zu 4,6 % zur Wärme aus erneuerbarer Energie bei.

2.3.2 Energetische Ausgangssituation in den Niederlanden

Die niederländische Energieversorgung ist zu fast 95 % auf fossile Brennstoffe angewiesen und auch in den kommenden Jahrzehnten werden fossile Brennstoffe weiterhin eine Rolle im Energiesystem spielen, jedoch wird ihre Bedeutung abnehmen (EZK 2016, S. 6).

Ausgehend vom Jahr 1990 mit 2.829 PJ ist der Primärenergieverbrauch in den Niederlanden weiter gestiegen. Im Jahr 2008 lag der Primärenergieverbrauch sogar 16 % über dem Wert von 1990 und ging bis 2015 wieder zurück auf 3.066 PJ, was dennoch 8,4 % mehr als 1990 sind. Der Endenergieverbrauch stieg ebenfalls von 2.204 PJ im Jahr 1990 auf 2.544 PJ im Jahr 2008 (+15,4 %) und betrug im Jahr 2015 rund 2.338 PJ und somit 6 % mehr als im Jahr 1990. Abb. 2-8 zeigt diese Entwicklung.

Der Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch steigt in den Niederlanden ebenfalls kontinuierlich, wie Abb. 2-6 zeigt. Mit einem Anteil von insgesamt 6,6 % am Endenergieverbrauch im Jahr 2017 (nach vorläufigen Zahlen) besteht jedoch noch ein deutlicher Unterschied zum Ziel von 14 % für das Jahr 2020. (CBS 2018, S. 18)

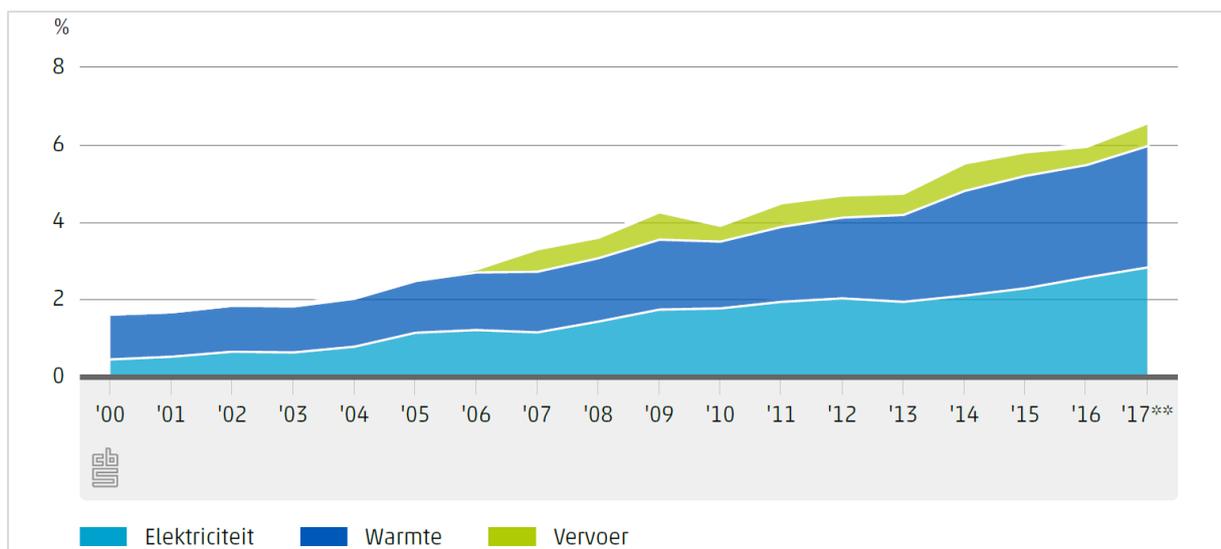


Abb. 2-6: Anteil erneuerbarer Energie und Aufteilung auf die Sektoren Strom, Wärme und Verkehr am Bruttoendenergieverbrauch der Niederlande. (CBS 2018)

Die Quellen für erneuerbare Wärme in den Niederlanden im Jahr 2016 zeigt Abb. 2-7. So stammen 2 % der erneuerbaren Wärme aus Solarthermie, 4 % aus Umgebungswärme und 11 %

aus Geothermie. Den größten Anteil mit 83 % macht die Biomasse aus. Diese teilt sich auf in Müllverbrennung und Co-Feuerung von Biomasse in Kraftwerken (21 % der erneuerbaren Wärme), Verbrennung von Holz in Kaminöfen von Haushalten (31 %), Nutzung von Biomassekesseln in Betrieben (18 %), Biogas aus Deponien, Kläranlagen, der Co-Fermentation von Gülle und sonstigen Quellen (11 %) und Biodiesel (1 %).

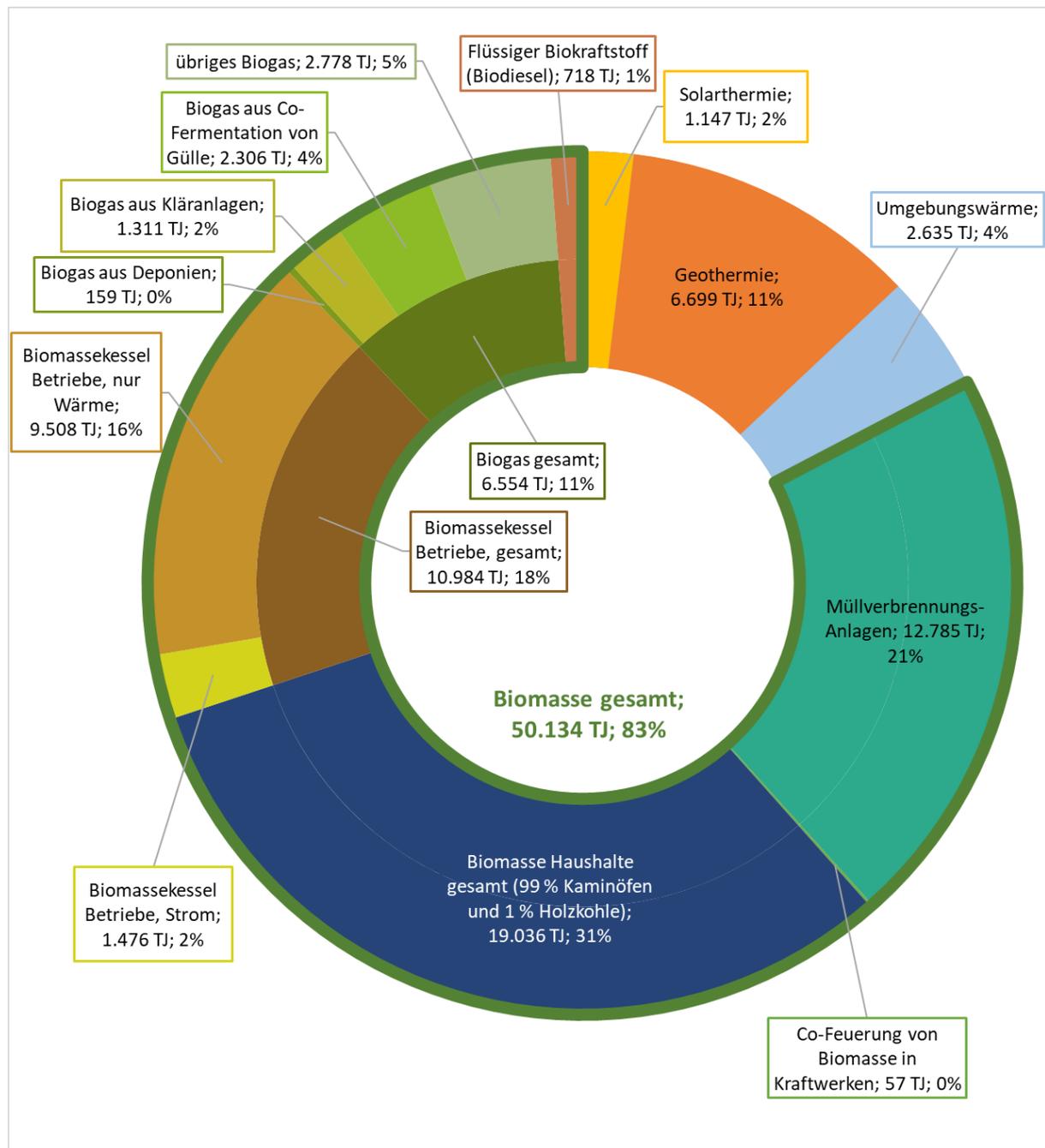


Abb. 2-7: Wärme aus erneuerbaren Energien im Jahr 2016 in den Niederlanden. Gesamt: 60.615 TJ. Nach CBS (2019c)

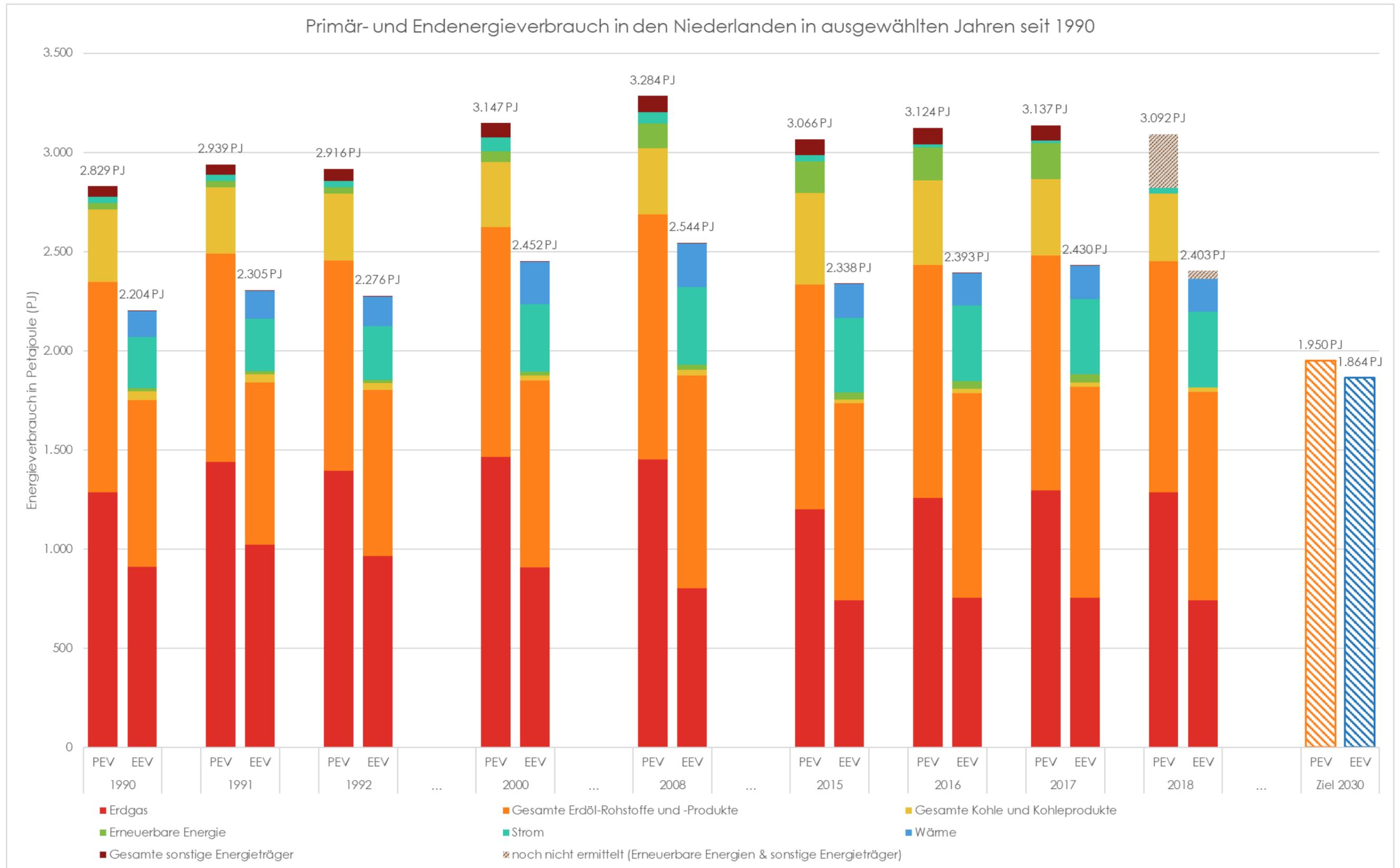


Abb. 2-8: Primärenergieverbrauch (PEV) und Endenergieverbrauch (EEV) in den Niederlanden in ausgewählten Jahren seit 1990. Nach CBS (2019b)

3 NACHHALTIGE WÄRMEVERSORGUNGSYSTEME

Dieses Kapitel befasst sich mit den theoretischen Grundlagen nachhaltiger Wärmeversorgungssysteme sowie Ansätzen und Konzepten für diese. Einleitend wird auf die Wärmeversorgung im Allgemeinen eingegangen, wobei der Fokus auf dem Wärmebedarf von Gebäuden, genauer auf dem Bedarf nach Raumwärme und Warmwasser liegt. Zuvor wird der Bereich Prozesswärme kurz erläutert. Anschließend werden die Quellen für Wärme aus regenerativer Energie dargestellt und danach die verfügbare Technik zur Bereitstellung dieser Wärme erläutert.

3.1 Grundlagen der Wärmeversorgung

Wie aus Abb. 2-4 zu entnehmen ist, unterteilt sich der Wärmeverbrauch in Deutschland auf die Bereiche Raumwärme, Warmwasser, sonstige Prozesswärme, Klimakälte und sonstige Prozesskälte. Den größten Anteil mit 27 % am Endenergieverbrauch im Jahr 2017 macht die Raumwärme aus. Die Warmwasserbereitstellung (5 %) wird zudem häufig über die gleiche Wärmequelle wie die Raumwärme gespeist. Der zweitgrößte Anteil entfällt mit 22 % auf sonstige Prozesswärme. Sonstige Prozesskälte und Klimakälte haben dagegen mit rund 2 % einen geringen Anteil. Abb. 3-1 zeigt die Aufteilung des Energieverbrauchs für Wärme ohne Klima- und Prozesskälte in Deutschland nach Sektoren für das Jahr 2017. Dabei wird deutlich, dass der Hauptteil der Prozesswärme auf den Sektor Industrie entfällt, wohingegen Warmwasser überwiegend in Haushalten benötigt wird. Ebenso entfällt der Großteil der Raumwärme auf die Haushalte sowie den Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD).

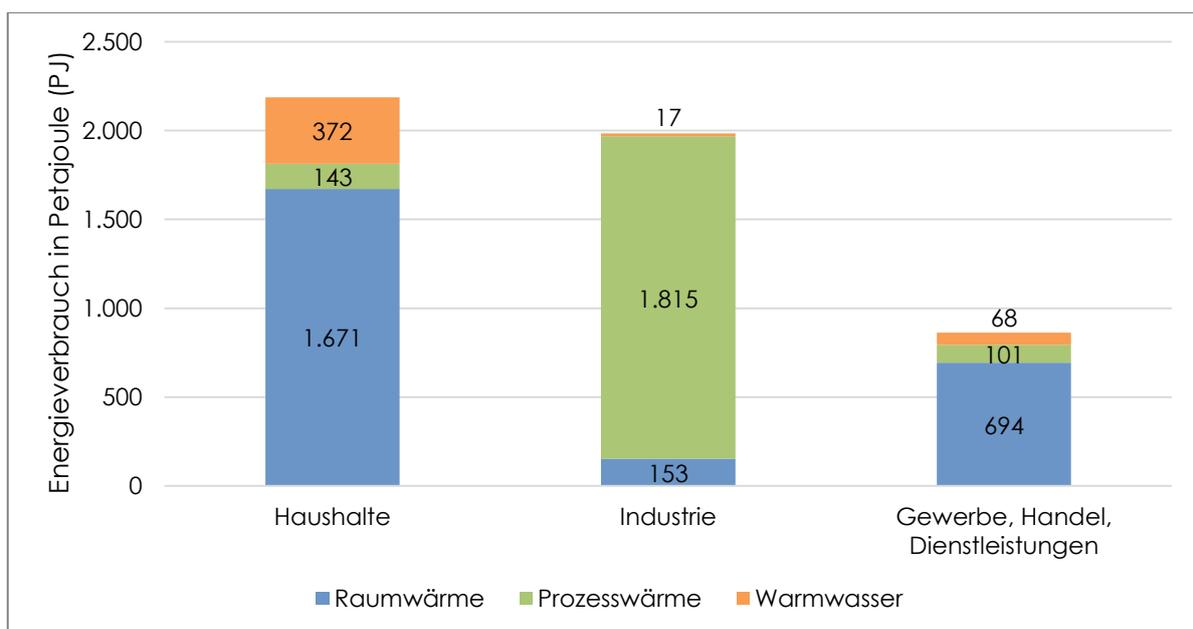


Abb. 3-1: Energieverbrauch für Wärmezwecke in Deutschland nach Sektoren 2017. Nach (AGEB 2018b)

Nachfolgend wird auf die Bereiche der Bereitstellung von Prozesswärme im Sektor Industrie sowie der Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser sowie Klimakälte in den Sektoren Haushalte und GHD eingegangen.

3.1.1 Bereitstellung von Prozesswärme

Im Bereich der Prozesswärme gibt es sehr unterschiedliche Temperaturniveaus. So zeigt eine Erhebung von Euroheat & Power aus dem Jahr 2011 die Nutzung der Prozesswärme-Temperaturen in der europäischen Industrie (Abb. 3-2). Die Erhebung unterscheidet drei Temperaturbereiche. Dabei entfallen 30 % der Prozesswärme auf Temperaturen unterhalb von 100 °C, 27 % bewegen sich zwischen 100 °C und 400 °C und der größte Anteil von 43 % der Prozesswärme in der europäischen Industrie nutzt Temperaturen über 400 °C.

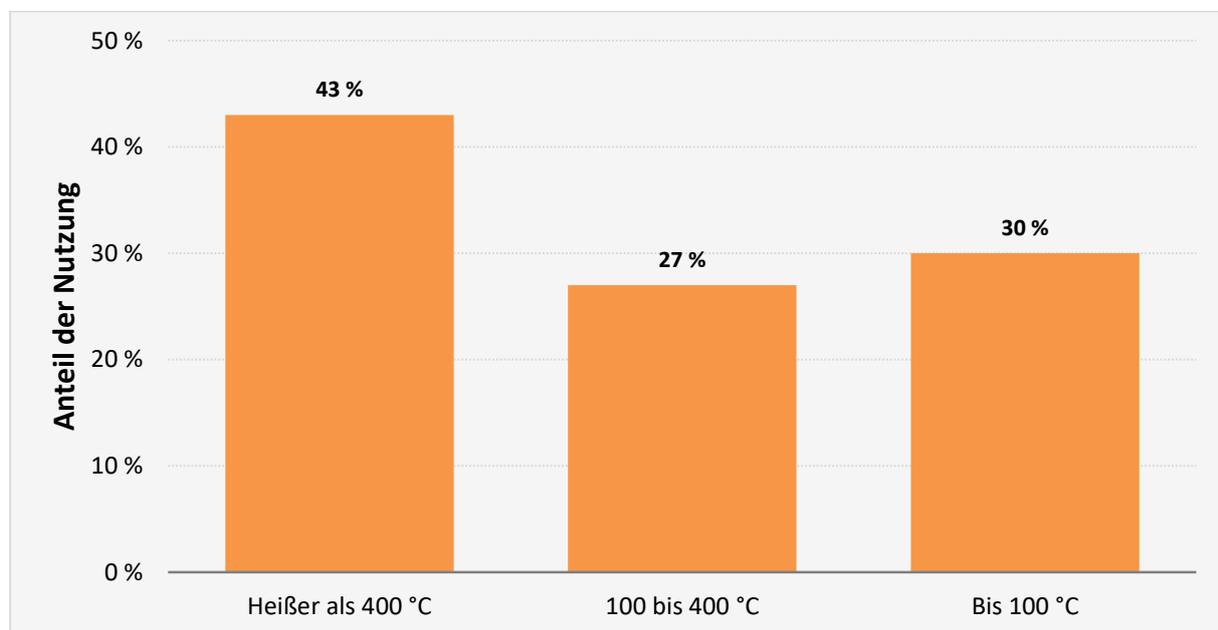


Abb. 3-2: Nutzung der Prozesswärme in der europäischen Industrie nach Temperaturen (in Prozent). (Euroheat & Power 2011)

Eine weitere Unterteilung nach Sektoren und Temperaturbereiche für das Jahr 2012 in den Niederlanden liefert Abb. 3-3. Auch hier wird deutlich, dass hohe Temperaturniveaus nur in der Industrie benötigt werden und die Industrie mit über 500 PJ Wärmebedarf den größten Anteil ausmacht. Da aus obigen Erkenntnissen hervorgeht, dass die Industrie in Deutschland vorrangig Prozesswärme benötigt, kann dies auch für die Niederlande angenommen werden. Daraus folgt, dass Prozesswärme in den Niederlanden mit einer großen Temperaturspreizung von unter 100 °C bis über 1.000 °C bereitgestellt werden muss.

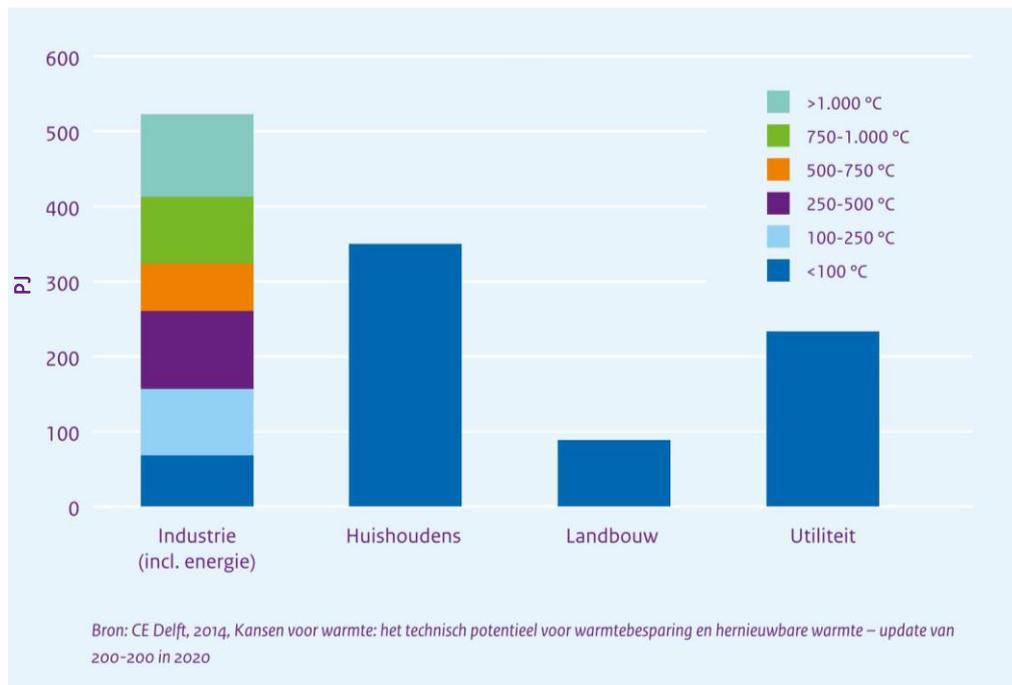


Abb. 3-3: Die Verteilung des Wärmebedarfs nach Temperaturbereichen und Sektoren im Jahr 2012 in den Niederlanden. (EZK 2016, S. 82)

Aufgrund des großen Umfangs der Prozesswärmebereitstellung und des begrenzten Umfangs dieser Arbeit, soll hier nicht weiter auf die Bereitstellung von Prozesswärme aus erneuerbaren Energien im Detail eingegangen werden.

3.1.2 Gebäudeenergiebedarf Wärme und Kälte

Mit 27 % am gesamten Endenergiebedarf in Deutschland und rund der Hälfte des Wärmebedarfs hat die Raumwärme einen erheblichen Anteil an der Energienachfrage.

Der Raumwärme- oder Heizwärmebedarf ist die Folge von Wärmeverlusten durch die Gebäudehülle (Transmissionswärmeverluste) sowie durch gewollten und ungewollten Luftaustausch (Lüftungswärmeverluste). Quellen für die Raumwärme sind vorrangig Energieträger, die über entsprechende Anlagen und Wärmeträger in Nutzwärme umgewandelt werden. Dazu kommen interne Wärmegewinne durch Personen und Wärmeverluste elektrischer Geräte sowie Wärmegewinne durch Sonneneinstrahlung. (Bollin 2009, S. 28)

Die Bereitstellung von Warmwasser erfolgt in der klassischen Wärmeversorgung von Gebäuden zumeist über den gleichen Wärmeträger wie bei der Raumwärme (Bollin 2009, S. 29). In einem Wohngebäude macht die Trinkwarmwasserbereitstellung bisher häufig einen Anteil von etwa 15 bis 30 % des gesamten Wärmeverbrauchs aus, welcher durch die verstärkte Wärmedämmung bei Neubauten zukünftig weiter steigen wird (Bollin 2009, S. 37). Der mittlere

Warmwasserverbrauch liegt im Wohnbereich bei 20 bis 40 Liter Warmwasser pro Person und Tag. Nach der Energieeinspar-Verordnung (EnEV) 2007 und DIN V 4701-10 wird von einem Pauschalwert von $12,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ für den flächenbezogenen jährlichen Wärmebedarf zur Warmwasserbereitung ausgegangen. (Bollin 2009, S. 31)

Einen bisher geringen, jedoch zukünftig steigenden Anteil am Gebäudeenergiebedarf macht der Kühlbedarf aus. Üblicherweise wird die Nutzkälte dabei durch elektrisch betriebene Kältemaschinen und die Nutzung von Umgebungswärme oder einer anderen Wärmequelle bereitgestellt. (Bollin 2009, S. 29)

Abb. 3-4 zeigt die Energieströme des Gebäudeenergiebedarfs von der Primärenergiebereitstellung bis zur Nutzenergie.

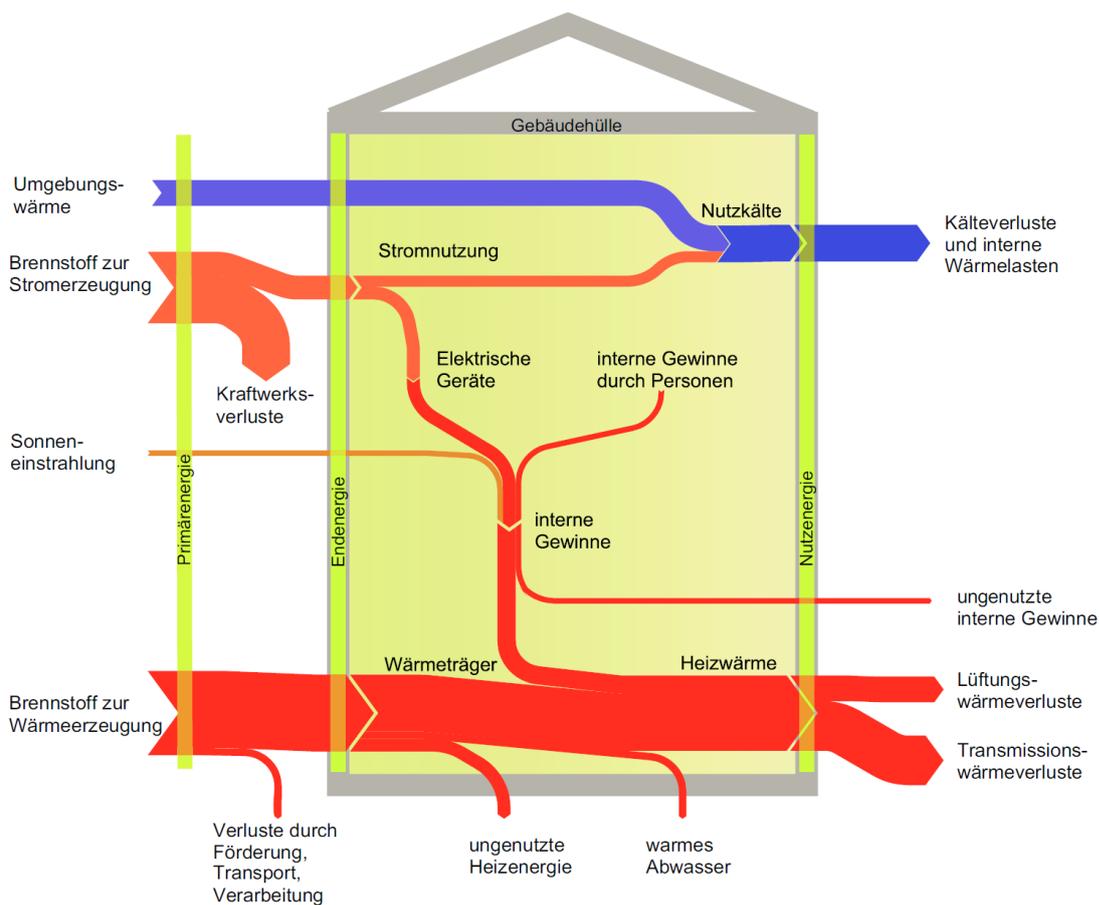


Abb. 3-4: Darstellung des Gebäudeenergiebedarfs von der Primärenergiebereitstellung bis zur Nutzenergie. (Bollin 2009, S. 28)

Der Gebäudeenergiebedarf hängt maßgeblich von der Gebäudetypologie ab. Für Wohngebäude gibt es verschiedene Einstufungen, die im Projekt TABULA für Europa vereinheitlicht dargestellt werden. Dabei gibt es die Größenklassen Einfamilienhaus (EFH), Reihenhaus (RH),

Mehrfamilienhaus (MFH) und großes Mehrfamilienhaus (GMH). Diese sind nach (IWU 2015, S. 17) wie folgt charakterisiert:

EFH: Freistehende Wohngebäude mit 1-2 Wohnungen.

RH: Wohngebäude mit 1 bis 2 Wohnungen als Doppelhaus, gereihtes Haus oder sonstiger Gebäudetyp.

MFH: Wohngebäude mit 3 bis 12 Wohnungen.

GMH: Wohngebäude mit 13 oder mehr Wohnungen.

Dazu kommt die Unterteilung in Baualtersklassen, welche weitere Merkmale des Gebäudes abbilden. Diese sind nachfolgend in Tab. 3-1 für Deutschland und die Niederlande dargestellt.

Tab. 3-1: Baualtersklassen von Wohngebäuden in Deutschland und den Niederlanden. (IWU 2013, 2014)

Deutschland				Niederlande	
Nr.	Baualters- klasse	Nr.	Baualters- klasse	Nr.	Baualters- klasse
1	... 1859	7	1979 ... 1983	1	... 1964
2	1860 ... 1918	8	1984 ... 1994	2	1965 ... 1974
3	1919 ... 1948	9	1995 ... 2001	3	1975 ... 1991
4	1949 ... 1957	10	2002 ... 2009	4	1992 ... 2005
5	1958 ... 1968	11	2010 ... 2015	5	2006 ... 2014
6	1969 ... 1978	12	2016 ...	6	2015 ...

In Deutschland und den Niederlanden teilen sich die Wohnungen wie in Tab. 3-2 gezeigt auf die Gebäudetypen auf.

Tab. 3-2: Anzahl und Anteil der Wohnungen nach Gebäudetyp in Deutschland und den Niederlanden (IWU 2013, 2014). Siehe auch Anh. 3

Anzahl der Wohnungen (in 1.000)					
	EFH	RH	MFH	GMH	Summe
Deutschland	Stand: 01.05.2011				
Anzahl	12.263	5.796	16.495	4.674	39.228
Anteil	31 %	15 %	42 %	12 %	100 %
Niederlande	Stand: 01.01.2012				
Anzahl	1.037	3.893	2.336		7.266
Anteil	14 %	54 %	32 %		100 %

EFH: Einfamilienhaus; RH: Reihenhaus; MFH: Mehrfamilienhaus; GMH: großes Mehrfamilienhaus

In Deutschland wurden 64 % der bestehenden Wohngebäude (Stand Mai 2011) vor 1979 gebaut (vgl. Anh. 2) (IWU 2015, S. 18) und unterlagen demnach überwiegend noch keinen gesetzlichen Regelungen zur Dämmung von Gebäuden, da die erste Wärmeschutzverordnung erst im November 1977 in Kraft trat (BReg 1977).

Aus energetischer Sicht fallen diese daher deutlich stärker ins Gewicht, als die übrigen, nach 1979 gebauten 36 % der Wohngebäude. Dies wird auch in Abb. 3-5 deutlich, welche die Verteilung des flächenbezogenen Energieverbrauchs des Gebäudebestands nach Baujahren zeigt. Werden die jeweiligen summierten Wohnfläche der vor 1979 gebauten Gebäude herangezogen, welche in Summe rund 65 % der gesamten Wohnfläche betragen (vgl. Anh. 4) (IWU 2015, S. 18), und für ein überschlägiges Ergebnis mit den im Abb. 3-5 angegebenen flächenbezogenen Energieverbräuchen multipliziert, so resultiert daraus, dass rund 75 % des flächenbezogenen Energieverbrauchs auf die vor 1979 gebauten Gebäude entfällt (vgl. Anh. 5). Der gesamte Energieverbrauch liegt bei dieser Rechnung bei 602 TWh/a bzw. bei 2.167 PJ, was von der Größenordnung zum Endenergieverbrauch für Raumwärme in Deutschland entspricht (vgl. Abb. 2-4).

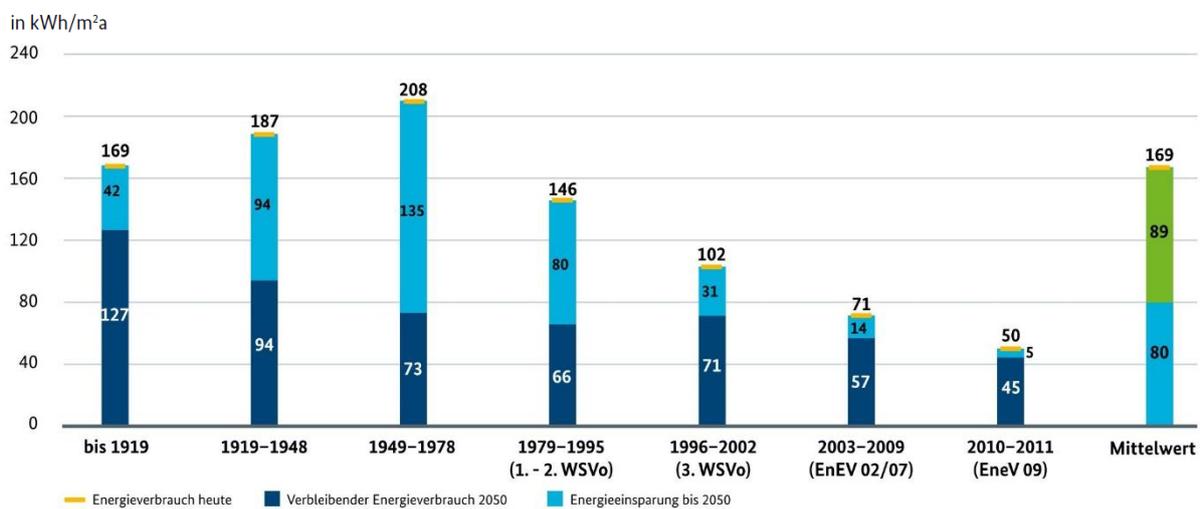


Abb. 3-5: Verteilung des flächenbezogenen Endenergieverbrauchs des Gebäudebestands in Deutschland nach Baujahren und Prognose des Einsparpotenzials bis zum Jahr 2050. Stand Dezember 2014. (BMWi 2014, S. 12)

Um den Primärenergiebedarf Deutschlands zu senken, ist die Energieeffizienz neben dem Ausbau erneuerbarer Energien ein entscheidender Faktor (vgl. Tab. 2-2). Nimmt man dafür an, dass eine Halbierung des Energieverbrauchs des gesamten Gebäudebestands durch Sanierung realistisch erscheint, so ergeben sich die in Abb. 3-5 dargestellten Minderungspotenziale (BMWi 2014). Die größten Potenziale bestehen bei den Gebäuden, die zwischen 1919 und 1995 gebaut wurden, was 78 % der Wohnfläche entspricht und fast 90 % des Einsparpotenzials birgt, sodass der Energieverbrauch dieses Gebäudebestandes um 60 % reduziert werden kann (vgl. Anh. 5).

In EFH und RH kommen in Deutschland bis 1994 überwiegend folgende Heizungssysteme zum Einsatz (IWU (o. J.)):

- Gas-Zentralheizung, für Raumwärme und Trinkwassererwärmung.
- Öl-Zentralheizung, für Raumwärme und Trinkwassererwärmung.
- Öl-Zentralheizung für Raumwärme und elektrischer Durchlauferhitzer für Trinkwassererwärmung.
- Elektrische Nachtspeicherheizung für Raumwärme und elektrischer Durchlauferhitzer für Trinkwassererwärmung.

Die Kesselanlagen sind Niedertemperatur-Kessel mit geringer Effizienz und die Zirkulationsleitungen sind schlecht gedämmt.

Für MFH und GMH kommen zu den oben genannten Systemen neben Warmwasserspeichern noch folgende Systeme dazu:

- Gas-Etagenheizung (Gas-Therme) für Raumwärme und Trinkwassererwärmung, Verteilung innerhalb der Wohnungen.
- Nah- oder Fernwärme (Gas, ohne KWK) für Raumwärme und Trinkwassererwärmung.

Ab 1995 wurden als Mindeststandard in EFH, RH, MFH und GMH folgende Systeme eingesetzt:

- Gas-Zentralheizung mit hoher Effizienz (Brennwertkessel) für Raumwärme und Trinkwassererwärmung.
- Biomasse-Zentralheizung mit hoher Effizienz (Holzpellets-Kessel) für Raumwärme und Trinkwassererwärmung.
- Elektrische Wärmepumpe (Außenluft), einschließlich Elektro-Heizstab für Last-Spitzen für Raumwärme und Trinkwassererwärmung unterstützt durch thermische Solaranlage und Warmwasser-Speicher.

Diese Systeme wurden in den folgenden Jahren effizienter, ab 2010 kamen zudem Abluftanlagen hinzu und ab 2016 wurden zunehmend auch Erd-Wärmepumpen eingesetzt. Zudem wurden die Wärmeverluste der Verteilungen minimiert.

In den Niederlanden werden individuelle Hochtemperatur-Brennwertkessel mit Erdgas für Raumwärme und Trinkwassererwärmung eingesetzt, sogenannte HR107-ketel. (IWU (o. J.))

3.1.2.1 Temperaturniveau Raumwärme

Die Klassifizierung der Wärmeversorgungssysteme in Gebäuden anhand des Temperaturniveaus ist in (Saxion 2019) wie folgt zusammengestellt:

- Sehr hohe Temperaturen über 90 °C in Versorgungsleitungen mit Wasser unter Druck oder Dampf.
- Hochtemperatur-Systeme mit Vorlauftemperaturen um 90 °C und Rücklauftemperaturen um 70 °C sind bei älteren Heizsystemen gängig. Zur Wärmeabgabe in den Räumen werden Heizkörper (Radiatoren) verwendet.
- Mitteltemperatur-Systeme mit Vorlauftemperaturen von 70 °C und Rücklauftemperaturen von 40 °C. Gegenüber Hochtemperatur-Systemen herrschen hier niedrigere Temperaturen, um die Wärmeverluste zu senken. Die Wärme wird ebenfalls über Heizkörper (Radiatoren) an den Raum abgegeben. Diese benötigen aufgrund der niedrigeren Temperaturen jedoch größere Oberflächen.
- Niedertemperatur-Systeme mit Vorlauftemperaturen von 55 bis 50 °C und Niedrigsttemperatur-Systeme mit Vorlauftemperaturen von 35 °C sowie jeweils Rücklauftemperaturen von 20 °C, erfordern angepasste Wärmeabgabesysteme, da durch die niedrigen Temperaturen deutlich größere Wärmeaustauschflächen nötig sind. Dafür werden folgende Systeme eingesetzt:
 - Heizkörper mit Heizkörpergebläse zur Erhöhung der Wärmekapazität des Heizkörpers.
 - Niedertemperatur-Heizkörper mit vergrößerter Wärmeaustauschfläche, welche speziell für den Einsatz mit niedrigeren Temperaturen entwickelt worden sind.
 - Fußboden-, Wand- oder Deckenheizungen mit hoher Wärmeaustauschfläche zur Nutzung niedriger Temperaturen.

Bei Nieder- und Niedrigsttemperatur-Systemen muss zudem auf eine gute Dämmung des Gebäudes geachtet werden, um komfortable Raumtemperaturen zu erreichen.

3.1.2.2 Temperaturniveau Warmwasser

Laut UBA (2011) wird Warmwasser bei Temperaturen zwischen 35 und 45 °C genutzt (UBA 2011, S. 3) und aus rein energetischer Sicht würde daher eine Aufheizung auf diese Temperaturen ausreichen. Jedoch ist der Hygiene-Aspekt bei der Nutzung von Trinkwasser nicht zu

vernachlässigen, welcher höhere Temperaturen erforderlich macht, um die Vermehrung möglicher Krankheitserreger im Trinkwasser zu vermeiden. Im öffentlichen Leitungsnetz der Wasserversorgungsunternehmen werden diese durch Temperaturen von deutlich unter 20 °C an einer Vermehrung gehindert (UBA 2011, S. 1). In Trinkwasser-Systemen von Gebäuden hingegen besteht die Gefahr, dass sich pathogene Keime, hier sind vor allem Legionellen zu nennen, in Biofilmen vermehren, da die Temperaturen im Leitungsnetz und Warmwasserspeicher ansteigen. Kritisch ist der Temperaturbereich von 20 bis 55 °C und lange Standzeiten des Wassers in den Trinkwasserinstallationen von einigen Stunden bis Tagen, welcher das Bakterienwachstum auf gesundheitlich kritische Konzentrationen begünstigt (UBA 2011, S. 2). Um das Legionellen-Wachstum zu verhindern sind Temperaturen ab 55 bis 60 °C erforderlich, zum Abtöten vorhandener Populationen müssen mindestens 70 °C im gesamten Warmwassersystem vorherrschen (UBA 2011, S. 3). Das Umweltbundesamt hält daher eine Warmwassertemperatur von 60 bis 55 °C für Großanlagen für notwendig (UBA 2011, S. 6).

3.2 Formen erneuerbarer Energiequellen für Wärme

Laut Lund u. a. (2014a, S. 1) beruhen zukünftige erneuerbare Energiesysteme auf der Kombination von fluktuierenden erneuerbaren Energiequellen wie Wind, Geothermie und Solarenergie sowie konstanten Ressourcen wie Abfall und Biomasse.

Die Wärme aus erneuerbaren Energien stammt in den Niederlanden gemäß Abb. 2-7 und in Deutschland gemäß Abb. 2-4 sowie Abb. 3-7 aus den folgenden Quellen:

- Solarthermie
- Geothermie
- Umgebungswärme
- Feste Biomasse
- Flüssige Biomasse
- Biogas
- Wasserstoff aus erneuerbaren Energien
- Synthetisches Methan aus erneuerbaren Energien
- Strom aus erneuerbaren Energien

Die verschiedenen Energiequellen werden nachfolgend beschrieben.

3.2.1 Solarthermie

Die direkte Nutzung von Solarstrahlung kann photovoltaisch und photothermisch erfolgen. Die photothermische Nutzung kann passiv über die architektonische Gestaltung von Gebäuden zur Bereitstellung von Raumwärme erfolgen oder aber über Solarkollektoren zur Bereitstellung von Prozesswärme, Kälteerzeugung, Raumheizung und Warmwasserbereitung. Architektonische Effekte sind z. B. solare Gewinne durch Fenster oder über Fassadenkollektoren oder transparente Wärmedämmung an Fassadenflächen. Im Gebäudebereich üblich sind Solarthermie-Anlagen zur Trinkwassererwärmung und Gebäudebeheizung. Zudem gibt es die Möglichkeit des Betriebs thermischer Kälteanlagen mit solarer Wärme sowie solarthermischer Kraftwerke zur Prozesswärme- und Stromerzeugung. Über Strom aus Photovoltaikanlagen ist der Betrieb von bspw. Wärmepumpen möglich. (Reich u. Reppich 2018, S. 64; Bollin 2009, S. 16)

3.2.2 Geothermie

Bei der Nutzung von Erdwärme wird zwischen oberflächennaher Erdwärme und Wärme aus tieferen Erdschichten unterschieden. Die Abgrenzung ist dabei nicht einheitlich geregelt. Nach Watter (2013) meint oberflächennahe Wärme die Wärmeenergie bis zu einer Tiefe von 100 Metern. Bollin (2009) nennt 400 Meter als Grenze, die auch in der VDI-Richtlinie 4640 genannt wird, schreibt aber auch, dass diese Grenze „willkürlich“ und „nicht technisch begründet“ ist (Bollin 2009, S. 20). Laut UBA (2015) wird bei der tiefen Geothermie in Tiefen bis 5.000 Meter gebohrt. Einheitlich ist jedoch die Beschreibung, dass oberflächennahe Wärme überwiegend gespeicherte Solarenergie darstellt, die durch Einstrahlung, Niederschlag, Grundwasser und Wärmeleitung im Boden gespeichert wird. Bis 100 Meter Tiefe liegt die Wärme auf einem Temperaturniveau von 5 bis 15 °C vor. Wärme aus tieferen Erdschichten und mit höheren Temperaturen wird dagegen durch Aktivitäten im Erdinneren hervorgerufen und beginnt in Mitteleuropa zumeist erst ab Tiefen von 1.000 bis 2.000 Metern, sofern keine vulkanische Aktivität in der Region vorliegt. Ab 150 °C und darüber kann geothermische Wärme zur Stromerzeugung genutzt werden. Unterhalb wird die Wärme z. B. über Heizzentralen zur Bereitstellung von Nah- und Fernwärme für Haushalte (Heizung und Warmwasser), Kleinverbraucher (z. B. Gewächshäuser) und Industrie (z. B. Holz Trocknung) genutzt oder auch zur (industriellen) Kühlung. Nutzbar gemacht wird diese Wärme oft mit erdgekoppelten Wärmepumpen oder erdberührten Bauteilen mit Wärmetauscher-System. (Bollin 2009, S. 20; Watter 2013, S. 117)

3.2.3 Umgebungswärme

Umgebungswärme oder Umweltwärme bezeichnet hier vorrangig die Wärme der Luft. Zur Umgebungswärme kann im weiteren Sinne auch die oberflächennahe Geothermie zählen, welche zuvor beschrieben wurde. Luft ist als Wärmequelle grundsätzlich auf der Erde überall verfügbar. Zur Nutzung ist die Kenntnis des Verlaufs von Lufttemperatur und Luftfeuchte über die Zeiträume eines Tages und eines Jahres nötig. Neben dem Temperaturniveau und der erzeugbaren Temperaturdifferenz ist die Luftfeuchte als Speicher latenter Wärme wichtig, welche durch Kondensation nutzbar gemacht werden kann. Auf der Erde liegt die jährlich gemittelte Temperatur bei 15 °C und der gemäßigten Klimazone Deutschlands und der Niederlande bei etwa 8 bis 10 °C. Dabei steigen die Maximaltemperaturen im Sommer auf über 30 °C. Im Winter können die Minimaltemperaturen unter -10 °C liegen. Für den Gebäudebereich sind die mittleren monatlichen Temperaturen wichtig, die im Sommer auf bis zu 19 °C steigen und im Winter bei etwa 0 °C liegen. Zur Nutzung der Umgebungswärme werden Wärmepumpen eingesetzt. (Bollin 2009, S. 24–25)

Neben der Nutzung von Umgebungswärme aus Luft kann auch die Wärme von Oberflächengewässern wie Flüssen und Seen zum Heizen oder Kühlen genutzt werden. Dabei ist auf die ökologischen Auswirkungen einer Abkühlung oder Erwärmung dieser natürlichen Gewässer zu achten, um das Ökosystem nicht zu beeinflussen. Auch hier werden Wärmepumpen zu Heizzwecken eingesetzt. (Gaudard u. a. 2017)

3.2.4 Restwärme

Als Restwärme wird die Wärme bezeichnet, die bei Produktionsprozessen von Unternehmen anfällt und anschließend dort keine sinnvolle Anwendung findet und somit an die Umgebung abgegeben wird. Diese kann genutzt werden, beispielsweise durch Energie- (Wärme, Strom) oder Stoffströme (Wasser oder Dampf), die beim Produktionsprozess freigesetzt werden. Eine weitere Möglichkeit der Restwärmenutzung ist die Nutzung des Abwassers aus einer Kläranlage. Auch die Wärmegewinnung aus Abwasser innerhalb von Siedlungen ist möglich und erfolgt im Kollektiv über Wärmetauscher im Kanalnetz (kiEMT 2019b). Der niederländische Begriff dafür ist Riothermie (Kombination der Wörter riool (niederländisch *Kanalisation*) und thermie). Da es im Deutschen keinen vergleichbaren Begriff für diese Technologie gibt, wird der Begriff „Riothermie“ im weiteren Verlauf dieser Arbeit für die Wärmerückgewinnung aus der Kanalisation verwendet.

3.2.5 Biomasse und Biogas

Unter den Oberbegriff Biomasse fällt sämtliche kohlenstoffhaltige Materie aus organischer Herkunft. Dazu gehört „die in der Natur lebende Phyto- und Zoomasse (Pflanzen und Tiere), die daraus resultierenden Rückstände (z. B. tierische Exkrememente), abgestorbene (aber noch nicht fossile) Phyto- und Zoomasse (z. B. Stroh) und im weiteren Sinne alle Stoffe, die beispielsweise durch eine technische Umwandlung und/oder eine stoffliche Nutzung entstanden sind bzw. anfallen (z. B. Schwarzlauge, Papier und Zellstoff, Schlachthofabfälle, organische Hausmüllfraktion, Pflanzenöl, Alkohol)“ (Kaltschmitt u. a. 2016, S. 3).

Aufgrund der Vielschichtigkeit von Biomasse besteht auch deren Bereitstellung als Energieträger aus einem breiten Spektrum von Prozessen, wie in Abb. 3-6 dargestellt.

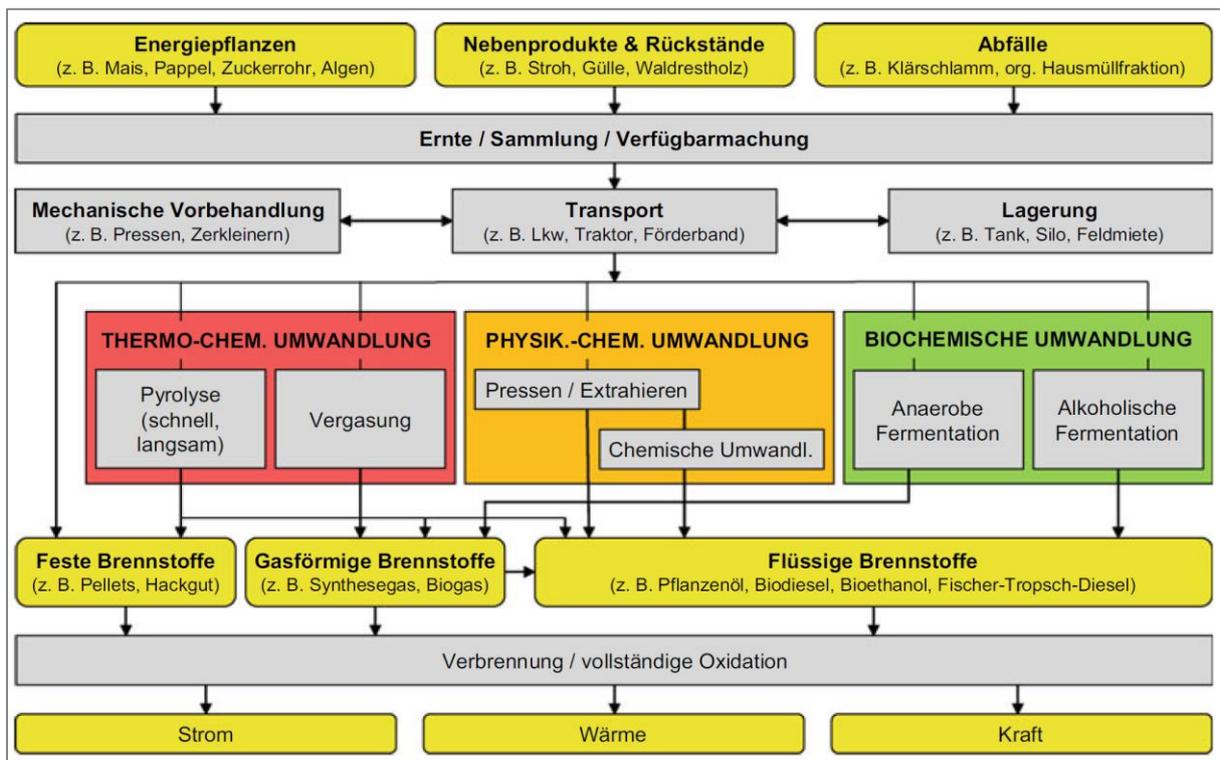


Abb. 3-6: Schematischer Aufbau typischer Bereitstellungsketten zur End- bzw. Nutzenergiebereitstellung aus Biomasse. (Kaltschmitt u. a. 2016, S. 4)

Die Unterteilung von Biomasse kann in den drei Kategorien feste Biomasse, flüssige Biomasse und Biogas erfolgen.

3.2.5.1 Feste Biomasse

Feste Biomasse hat laut AEE (2018) den größten Anteil von Wärmebereitstellung aus Biomasse.

Die Entstehung und Zusammensetzung pflanzlicher Biomasse wird nachfolgend beschrieben.

Beim Pflanzenwachstum wird über Photosynthese mit Hilfe von Sonnenenergie organisches Material erzeugt. Dabei dient das Kohlenstoffdioxid (CO₂) in der Luft als Kohlenstoff- und Sauerstoffquelle und Wasser (H₂O) als Wasserstoffquelle. Daraus werden Cellulose, Hemicellulose und Lignin gebildet. Cellulose ist ein Hauptbestandteil von pflanzlichen Zellwänden und dient zusammen mit der Hemicellulose als Gerüst in der Zellwand. Lignin wird in die pflanzliche Zellwand eingelagert und sorgt, als dritter Hauptbestandteil von dieser, für die Verholzung der Zelle. Holz besteht vorrangig aus Kohlenstoff (Größenordnung 47 bis 50 %), Sauerstoff (Größenordnung 42 bis 45 %), Wasserstoff (Größenordnung 6 bis 7 %), Stickstoff (Größenordnung 0,1 bis 0,6 %) und Schwefel (Größenordnung 0,02 bis 0,05 %) und hat sehr komplexe Molekularstrukturen. Der Heizwert von wasserfreiem Holz liegt zwischen 4,9 und 5,3 kWh/kg. (Watter 2013, S. 151–154)

3.2.5.2 Flüssige Biomasse

Flüssige biogene Brennstoffe werden überwiegend als Kraftstoff in Form von Biodiesel/Pflanzenölen und Bioethanol eingesetzt (Kaltschmitt u. a. 2016, S. 23). Bioethanol wird dabei hauptsächlich aus Zuckerrohr, Mais oder Getreide hergestellt (Kaltschmitt u. a. 2016, S. 23). Die Nutzung von Pflanzenölen als Kraftstoff geschieht überwiegend in der verarbeiteten Form als FAME (Fatty Acid Methyl Ester) (Kaltschmitt u. a. 2016, S. 23). Der Einsatz dieser flüssigen Brennstoffe zur Wärme- oder Stromerzeugung ist ebenfalls möglich, jedoch meist zu teuer (Kaltschmitt u. a. 2016, S. 21–23).

Eine weitere Form der flüssigen Biomasse, die zur Energiebereitstellung genutzt wird, ist die bei der Papierherstellung anfallende Schwarzlauge, welche zumeist direkt vor Ort in dafür entwickelten Feuerungsanlagen als Brennstoff die Energienachfrage der Papierfabriken deckt. (Kaltschmitt u. a. 2016, S. 314)

3.2.5.3 Biogas

Biogas entsteht in verschiedenen Prozessen und aus diversen Ausgangsstoffen. Zu nennen sind hier vor allem die Gewinnung in Biogasanlagen (BGA) aus landwirtschaftlichen Substraten und Energiepflanzen, die Gewinnung aus organischen Abfällen aus der (Lebensmittel-)Industrie sowie aus organischen Siedlungsabfällen auf Deponien (Deponiegas) und bei der Abwasserreinigung (Klärgas) (Kaltschmitt u. a. 2016, S. 21). Als brennbares Gas kann dieses direkt zur Wärmeerzeugung oder zur gekoppelten Wärme- und Stromerzeugung in entsprechenden Anlagen genutzt werden oder auf Erdgasqualität aufbereitet werden, was den Einsatz in herkömmlichen erdgas-gefeuerten Anlagen und die Einspeisung in das Erdgasnetz ermöglicht. (Kaltschmitt u. a. 2016, S. 1566)

Biogas aus der anaeroben Fermentation besteht zu 45 bis 65 Vol.-% aus Methan (CH_4), zu 35 bis 55 Vol.-% aus CO_2 sowie aus verschiedenen Spurengasen und Wasser (Kaltschmitt u. a. 2016, S. 1722).

3.2.6 Wasserstoff aus erneuerbaren Energien

Wasserstoff kann mittels thermochemischer Umwandlung, durch Elektrolyse, über biologischer Stoffwechselprozesse sowie photochemisch gewonnen werden (Reich u. Reppich 2018, S. 247; Watter 2013, S. 307–315). Nicht alle Verfahren sind endgültig entwickelt und die Wasserstoffherstellung ist oft sehr energieintensiv (Reich u. Reppich 2018, S. 247). In Bezug auf die Herstellung aus erneuerbaren Energien ist vor allem die Herstellung mittels Elektrolyse unter Verwendung von regenerativ erzeugtem Strom aus den fluktuierenden Energiequellen Windkraft und Photovoltaik (PV) (Reich u. Reppich 2018, S. 247) sowie die biologische Wasserstoffherstellung (Reich u. Reppich 2018, S. 255–256; Watter 2013, S. 314–315) relevant.

Um Wasserstoff für die Wärmeversorgung zu nutzen, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Eine davon ist die direkte Verbrennung des Wasserstoffs in einem entsprechenden Kessel, analog zur Erdgasverbrennung in entsprechenden Heizungsanlagen (Dodds u. a. 2015, S. 2073). Eine weitere Möglichkeit ist die Nutzung des Wasserstoffs in einer Brennstoffzellenheizung, welche Strom sowie Wärme bereitstellt und somit eine Anlage zur Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) darstellt (Dodds u. a. 2015, S. 2073).

3.2.7 Synthetisches Methan aus erneuerbaren Energien

Der zuvor erwähnte, regenerativ durch Elektrolyse bereitgestellte Wasserstoff kann in einem weiteren Schritt, dem Sabatier-Prozess, zusammen mit CO_2 zu Methan umgewandelt werden. Das benötigte CO_2 kann dabei z. B. aus Biogasanlagen stammen. Ein weiterer Ansatz ist die biologisch katalysierte Methanisierung, die bei geringeren Temperaturen abläuft und bei der Mikroorganismen zum Einsatz kommen (Burkhardt u. a. 2015).

3.2.8 Strom aus erneuerbaren Energien

Strom aus erneuerbaren Energien stammt beispielsweise aus der Windkraft, der Photovoltaik, der Wasserkraft, aus Brennstoffzellen oder aus der Verbrennung von Biomasse.

Windkraftanlagen (WKA) wandeln die kinetische Energie des Windes in mechanische Energie (Rotation) und darüber in elektrische Energie mittels eines Generators um. Aus dem Betz'schen Gesetz folgt, dass der theoretisch maximal erreichbare Wirkungsgrad von WKA etwa 59 %

beträgt (Wagner 2013). Durch Umwandlungs- und Reibungsverluste liegt der tatsächlich erreichbare Wirkungsgrad darunter. Eine der derzeit leistungsstärksten On-Shore-Windkraftanlagen E-126 des Herstellers Enercon hat beispielsweise einen maximalen Leistungskoeffizienten von etwa 48 % und eine Nennleistung von 7,58 MW (Enercon 2016).

Bei der photovoltaischen Nutzung wird Strom durch die direkte Umwandlung der elektromagnetischen Solarstrahlung in der Photovoltaik-Zelle, einem Halbleiterelement, welches den photoelektrischen Effekt nutzt, bereitgestellt (Singh 2013). Zudem kann über ein solarthermisches Kraftwerk ebenfalls Strom bereitgestellt werden. (Reich u. Reppich 2018, S. 64)

Wasserkraft wird durch Wellen-, Meeres-, Gezeiten-, Fluss- und Speicherkraftwerke nutzbar gemacht. Die meisten dieser Kraftwerke nutzen dabei die kinetische Energie fließenden Wassers über verschiedene Arten von Turbinen zum Betrieb von Generatoren. Dies geschieht entweder direkt durch vorhandene Strömungen in z. B. Flüssen oder durch vorheriges Aufstauen von Wasser, welches anschließend über Turbinen strömen gelassen wird. Auch die Verdrängung von Luft oder einer Arbeitsflüssigkeit durch Wellenbewegungen kann zum Antrieb entsprechender Turbinen genutzt werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Nutzung von unterschiedlichen Salzgehalten im Wasser. Hierbei wird der an einer eingesetzten Membran entstehende osmotische Druck genutzt, um eine Strömung zu erzeugen die wiederum eine Turbine antreibt. (Watter 2013, S. 88–112)

Wie in Abschnitt 3.2.6 beschrieben, kann eine Brennstoffzelle, welche mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff betrieben wird, ebenfalls CO₂-neutralen Strom bereitstellen. Ebenso kann die direkte Verbrennung von Wasserstoff sowie Biogas oder Biomethan in entsprechenden Anlagen, wie z. B. einem Blockheizkraftwerk (BHKW), Strom bereitstellen. Auch die Verbrennung fester Biomasse, wie Holz, kann beispielsweise über einen Gas- und Dampf-Prozess (GuD-Prozess) eine Turbine und darüber einen Generator antreiben, um Strom bereitzustellen.

3.2.9 Erreichbare Temperaturen aus erneuerbaren Wärmequellen

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, sind in der Wärmeversorgung unterschiedliche Temperaturniveaus notwendig. Zum Teil wird es in der Zukunft eine Entwicklung hin zu niedrigeren Temperaturniveaus geben, wie z. B. in der Raumwärme (BMW 2014) und zum Teil wird sich die Anforderung des Temperaturniveaus in bestimmten Anwendungsfeldern auf absehbare Zeit nicht ändern, bei bestimmten Industrieprozessen beispielsweise. Welche Temperaturen sich aus

erneuerbaren Wärmequellen erzielen lassen zeigt Abb. 3-7. Hier wird deutlich, dass die in vielen Bereichen erforderlichen Temperaturen erreicht werden.

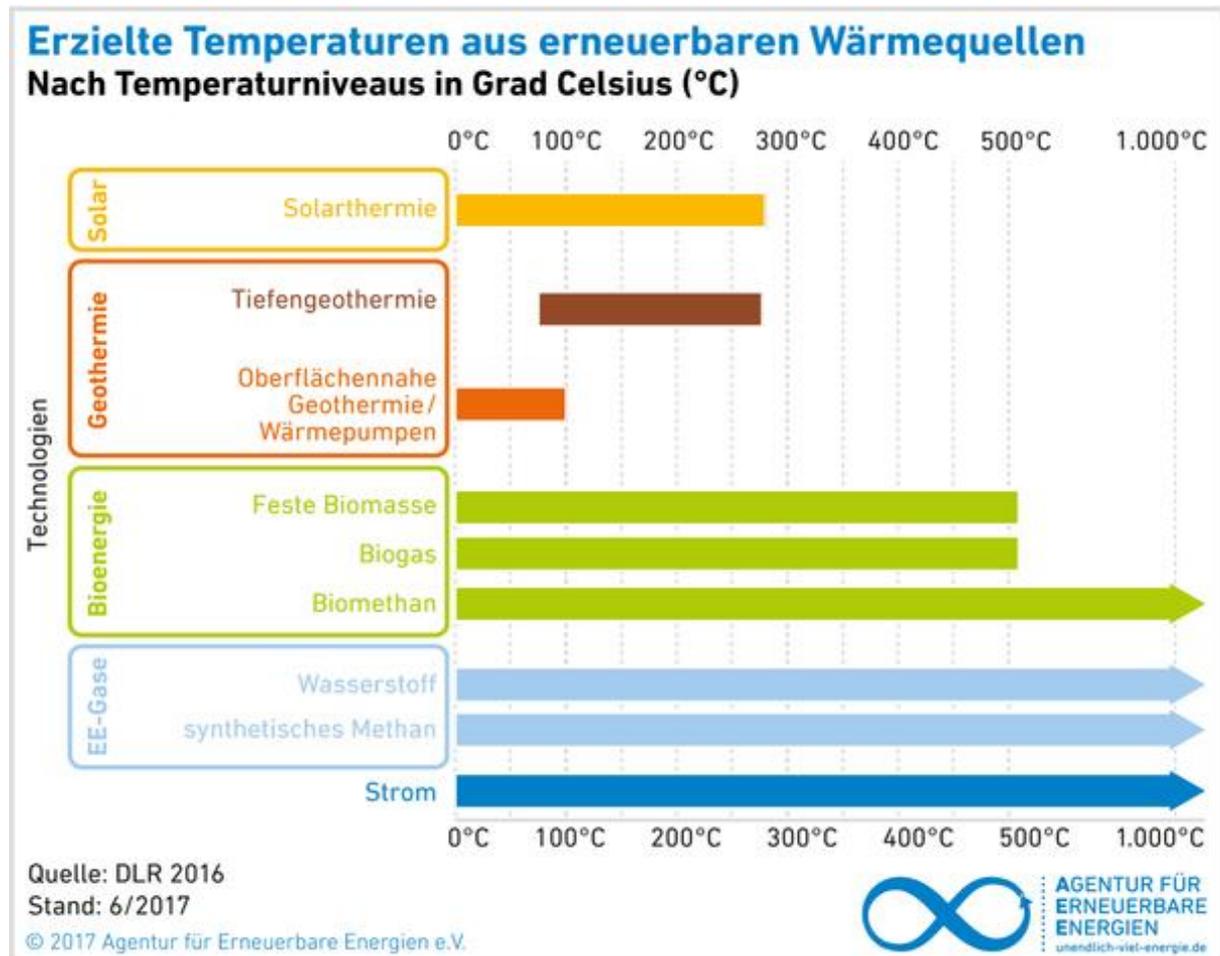


Abb. 3-7: Erzielte Temperaturen aus erneuerbaren Wärmequellen. (AEE 2017)

3.3 Technische Systeme zur regenerativen Wärmebereitstellung

Für eine hundertprozentige erneuerbare Energieversorgung muss das gesamte Spektrum des Energiesystems gesamtheitlich betrachtet werden. Das bedeutet, dass beispielsweise das Smart-Grid-Konzept nur ein Teil der Betrachtung ist, ebenso wie 4th generation district heating, Vehicle-2-Grid und Power-to-Gas. Der Fokus darf folglich nicht nur auf dem Strom-, dem Wärme- oder dem Transportsektor liegen, sondern muss den Ansatz der Sektorkopplung verfolgen und eine ganzheitliche Betrachtung ermöglichen. (Lund u. a. 2014b)

Die regenerative Wärmebereitstellung ist dementsprechend nur ein Baustein auf dem Weg zur nachhaltigen Energieversorgung und muss zusammen mit den anderen Bereichen des Energiesystems weiterentwickelt werden.

Folgende Systeme zur regenerative Wärmebereitstellung gehen aus (Zech 2015, S. 18) sowie den Machbarkeitsstudien des WiEfm-Projekts (FH Münster o. J.) hervor:

Zentrale Versorgung:

- Konventionelles Nahwärmenetz
 - Solarthermie-Freiflächenanlage
 - Biomethan-BHKW
 - Biomethan-Brennwertkessel
 - Biogas-BHKW/Abwärme Biogasanlage
 - Holzpellet-Kessel (und Solarkollektor)
 - Holzhackschnitzel-Kessel/-Heizwerk
 - Holzvergaser-BHKW
 - Holzfeuerung mit Restholz holzverarbeitender Unternehmen
 - Biomasse-Kessel mit Laubbriketts
 - Biomasse-Heiz(kraft)werk
 - Pflanzenöl-BHKW
 - Abwärme aus Industrie- und Gewerbegebieten
 - Wärme aus Kühltürmen (Industrie)
 - Abwärme Kläranlage
- Kaltes Nahwärmenetz/Niedertemperatur-Nahwärmenetz
 - Erdwärmesonden und Erdwärmekollektoren (oberflächennahe Geothermie)
 - Wärmepumpen (ggf. mit PV-Unterstützung)
 - Solarthermie
 - Abwasser
 - Nutzung thermischer Energie aus Oberflächenwasser
- Speicher
 - Saisonale Langzeit-Wärmespeicher
 - Phase Change Material(PCM)-Speicher (Phasenwechselspeicher) / Eisspeicher

- Pufferspeicher in verschiedenen Größen

Dezentrale Versorgung:

- Holzpellet-Heizungsanlage
- Luft-Wärmepumpe ohne und mit PV-Anlage
- Erdsonden-Wärmepumpe ohne und mit PV-Anlage
- Holzpellet-Ofen mit Wassertasche und Solarkollektor
- Photovoltaisch-thermische Solarkollektoren mit Wärmepumpe

Aus der Untersuchung der 31 Machbarkeitsstudien (12 deutsche und 19 niederländische) im Rahmen dieser Arbeit (siehe Anh. 6) geht hervor, dass rund zwei Drittel der Studien sich mit Wärmenetzen beschäftigen. In 55 % der Studien ist die Wärmespeicherung ebenfalls Gegenstand der Untersuchung. Dabei werden, neben klassischen Pufferspeichern, sowohl auf deutscher als auch auf niederländischer Seite saisonale Wärmespeicher untersucht. Ausschließlich in niederländischen Studien kommt dagegen die Wärme- und Kälte-Speicherung im Erdreich ohne Dämmung vor, im Niederländischen *Warmte Koude Opslag* (WKO) genannt und einem Aquifer-Speicher entsprechend.

Mit fast 60 % am häufigsten untersucht, sind auf Biomasse beruhende Systeme zur Wärmeerzeugung. Dabei wurden vor allem Gaskessel oder gasbetriebene BHKWs untersucht, die Biogas oder Biomethan verbrennen sowie Holzkessel, welche Holzhackschnitzel oder Holzpellets einsetzen. In 45 % der Studien wurden Abwärmepotenziale aus Industrieprozessen, Gewerbegebieten, Biogasanlagen und Kläranlagen sowie der Kanalisation untersucht. Die Wärmerückgewinnung mittels Wärmetauschern aus der Kanalisation (Riothermie) ist vor allem in den Niederlanden geläufiger, siehe Abschnitt 3.2.4. Wärmepumpen werden oft im Zusammenhang mit der Nutzung von Umweltwärme aus Luft, Oberflächengewässern und Geothermie, aber auch der Abwärmenutzung oder hinsichtlich der Speicherung sowie dem Einsatz in kalten Wärmenetzen eingesetzt. Diese gehören zu den ebenfalls in 45 % der Studien untersuchten Power-to-Heat-Technologien. Sie werden dezentral in Gebäuden oder zentral mit größeren Leistungen eingesetzt und ermöglichen die Anhebung oder auch Absenkung der Temperaturen aus den Wärmequellen auf ein Niveau, das zur Nutzung oder Speicherung erforderlich ist. Bei der Geothermie, die in 23 % der Studien untersucht wurde, sind neben Wärmepumpen zudem Flächenkollektoren oder Erdwärmesonden nötig, um die Wärme der Bodenschichten nutzbar machen zu können. In 35 % der Studien wurde zudem die Nutzung der Sonneneinstrahlung

über Solarthermie-Anlagen, Photovoltaikanlagen oder einer Kombination aus beidem untersucht. (vgl. Anh. 6)

Nachfolgend werden die oben genannten Technologien Biogas-Kessel und -BHKW, Biomasse-Kessel, Wärmepumpe, Flächenkollektor, Erdwärmesonde und Solarthermie-Anlage beschrieben. Zudem folgt eine Beschreibung von Wärmenetzen.

Die Beschreibung verschiedener Speichertechnologien erfolgt in Abschnitt 3.4.3.

3.3.1 Biogas-/Biomethan-Kessel und -Blockheizkraftwerk

Gaskessel für Biogas oder Biomethan stellen Wärme durch die Verbrennung des Gases bereit. Biomethan-Kessel sind im Grunde Erdgas-Kessel, da Biomethan Erdgasqualität besitzt. Oft wird Biomethan vertraglich bezogen; die Anlage bezieht das Gas aber praktisch aus dem Erdgasnetz. Wird Biogas in unaufbereiteter Form verwendet, so besitzt es einen geringeren Methan-Anteil und einen höheren CO₂-Anteil als Erdgas. Daher sind Biogas-Kessel auf diese andere Gaszusammensetzung angepasst. Genauso kann das Biomethan oder Biogas in KWK-Anlagen genutzt werden. Biogasanlagen verfügen meist über Biogas-BHKWs, die direkt mit der Rohgasleitung der Anlage verbunden sind und Strom sowie Wärme erzeugen. Ein Teil der Wärme wird von der Biogasanlage selbst benötigt, z. B. für die Fermenter, der Rest kann beispielsweise über ein Wärmenetz zur Wärmeversorgung von Gebäuden beitragen. (FNR o. J.-a)

3.3.2 Biomasse-Kessel

In einem Biomasse-Kessel wird Wärme durch das Verbrennen von Holz bereitgestellt. Dabei liegt das Holz üblicherweise als Stückholz, Holzbriketts, Holzpellets oder Holzhackschnitzel vor. (Watter 2013, S. 180)

Bei der Verwendung von Stückholz oder Scheitholz als Brennstoff sind Einzelraumfeuerungen oder Zentralheizungen möglich. Beide Typen werden in der Regel von Hand beschickt. Bei der Einzelraumfeuerung dient die Anlage der Beheizung einzelner Räume und kann z. B. als Kamin, Kaminofen, Dauerbrandofen, Kachelofen oder Speicherofen ausgeführt sein. Für den Wohnbereich liegen die Leistungen solcher Anlagen etwa zwischen vier und 15 kW, aber auch Anlagen mit 50 kW sind erhältlich. Auch die Nutzung von Holzbriketts aus Holzresten der industriellen Holzverarbeitung ist möglich. (FNR o. J.-b)

Zentralheizungen erhitzen dagegen die wasserführende Heizungsinstallation und versorgen darüber das gesamte Gebäude mit Wärme. Hier werden Oberbrandkessel und Scheitholzvergaserkessel unterschieden. Die Wirkungsgrade von Oberbrandkesseln sind vergleichsweise

gering und aufgrund des oberen Abbrandes des Scheitholzes fallen vergleichsweise hohe Staub- und Kohlenmonoxid-Emissionen an. Scheitholzvergaserkessel dagegen arbeiten mit unterem oder seitlichem Abbrand, bei dem das Holz im Glutbett vergast und die entstehenden Gase nach unten oder seitlich in eine separate Brennkammer geführt und dort gleichmäßig verbrannt werden. Dadurch ist ein höherer Wirkungsgrad erzielbar. Hier werden Heizungsanlagen mit bis zu etwa 200 kW Leistung angeboten. (FNR o. J.-b)

Holzpellet-Heizungen werden in drei Bauarten angeboten. Dies sind Pelletöfen, Pellet-Zentralheizungen und Pellet-Brenneraufsätze. Diese nutzen Holzpellets als Brennstoff, bei welchen es sich um zylinderförmige, zumeist aus Säge- und Industrierestholz hergestellte Presslinge handelt, die ein bis vier Zentimeter lang und sechs Millimeter im Durchmesser sind. Die Beschickung kann je nach Ausführung automatisch oder per Hand erfolgen. Pelletöfen sind dabei grundsätzlich zur Aufstellung im Wohnraum als Einzelraum-Feuerungsanlagen gedacht, wohingegen Pellet-Zentralheizungen wie zuvor bei den Scheitholzkesseln beschrieben funktionieren und auch als Scheitholz-Pellet-Kombinationskessel verfügbar sind. Zudem können mit Pellet-Brenneraufsätzen bestehende Ölheizkessel von Heizöl auf Holzpellets umgestellt werden. Pelletöfen liegen je nach Verwendungszweck in Leistungsbereichen zwischen fünf und 30 kW und Pellet-Zentralheizung reichen von vier bis 300 kW. Auch Pellet-Feuerungen bis 1.000 kW Nennleistung sind verfügbar. (FNR 2013)

Holzhackschnitzelfeuerungen haben einen breiten Einsatzbereich vom Ein- und Mehrfamilienhaus und der Landwirtschaft bis hin zu großen Biomasse-Heiz(kraft)werken für kommunale, gewerbliche und industrielle Zwecke. Sie gehören zu den automatisch beschickten Biomassefeuerungen und werden ab Leistungen von etwa 10 kW angeboten und reichen bis in den dreistelligen Megawatt-Bereich. Hergestellt werden Hackschnitzel unter anderem aus Holz, welches bei der Waldbewirtschaftung, bei der Holzbe- und -verarbeitung, in der Landwirtschaft und in der Landschaftspflege sowie in der Restholz- bzw. Gebrauchtholzaufbereitung anfällt. Die Holzhackschnitzel werden mit mobilen oder stationären Hackern mit schneidenden Werkzeugen hergestellt, wobei die Art und Herkunft des Holzes die Verfahrens- und Logistikketten sowie auch die Eigenschaften und Qualität der Hackschnitzel bestimmen. Es gibt verschiedene Qualitätsstandards bei Holzhackschnitzeln und die verschiedenen Anlagen haben unterschiedliche Anforderungen an den eingesetzten Brennstoff. Kleinere Anlagen mit Leistungen von 15 bis etwa 200 kW benötigen meistens trockene Feinhackschnitzel. (FNR 2017)

3.3.3 Wärmepumpe

Eine Wärmepumpe (abgekürzt WP) transportiert thermische Energie von einer Wärmequelle auf niedrigerem Temperaturniveau unter Einsatz von meist elektrischer Antriebsenergie zu einer Wärmesenke auf höherem Temperaturniveau. So erhält man mit einem vergleichsweise geringen Einsatz von Exergie (z. B. elektrischem Strom) und der Nutzung oft frei verfügbarer Anergie (z. B. Umgebungswärme) eine gewünschte Wärmemenge für z. B. Raumheizungszwecke. Dieser Mechanismus kann genauso zum Kühlen verwendet werden, wobei dann der Raum die Wärmequelle und nicht die Wärmesenke darstellt. Es gibt verschiedene Arten von Wärmepumpen mit Unterschieden in der Funktionsweise und den erzielbaren Leistungen. Dabei gibt es stets einen Kreislauf mit Kältemittel, welches Wärme aus der Wärmequelle aufnimmt (Verdampfer) und an der Wärmesenke abgibt (Kondensator) und dabei seinen Aggregatzustand zwischen flüssig und gasförmig verändert. (Paschotta 2010a)

Sehr effizient und weit verbreitet sind Kompressionswärmepumpen. Diese können über Elektromotoren oder über Gasmotoren bzw. Gasturbinen angetriebene Kompressoren nutzen. Dieser Kompressor sorgt dafür, dass das Kältemittel, welches durch die Wärmeaufnahme verdampft ist, komprimiert und dadurch weiter erhitzt wird. Anschließend gibt das Kältemittelgas seine Wärme an die Wärmesenke ab und wird anschließend wieder entspannt, sodass es am Ausgangspunkt des Kreislaufs wieder in flüssiger Form vorliegt und erneut Energie aus der Wärmequelle aufnehmen kann. (Paschotta 2010a)

Eine weitere Art der Wärmepumpe ist die Absorptionswärmepumpe. Diese arbeitet anstelle des Kompressors mit einem sogenannten thermischen Verdichter, wobei hohe Temperaturen zum Einsatz kommen. Dabei wird das gasförmige Kältemittel nach dem Verdampfer im Absorber von einem Lösungsmittel aufgenommen. Eine Druckerhöhung ist demnach hier nicht nötig. Das kältemittelreiche Lösungsmittel wird mit einer Pumpe in einen Austreiber transportiert, wo unter Einsatz hoher Temperaturen, z. B. aus der Verbrennung von Erdgas (Gas-WP), das Kältemittel wieder aus dem Lösungsmittel ausgetrieben wird und im gasförmigen Zustand in den Kondensator gelangt, wo es die Nutzwärme abgibt und verflüssigt wird. Auch das Lösungsmittel im Lösungsmittelkreislauf wird abgekühlt und steht anschließend im Absorber wieder zur Verfügung. Bei einer Adsorptionswärmepumpe kommt dagegen kein Lösungsmittel zum Einsatz, sondern ein poröser Festkörper wie z. B. Zeolith, an den sich das Kältemittel im Prozessschritt zwischen Verdampfer und Kondensator anlagert. Zur nachhaltigen Kühlung eignet sich hier besonders der Einsatz von Solarthermie-Kollektoren als Wärmequelle für die

Absorptionswärmepumpe, da gerade im Sommer der Kühlbedarf bei gleichzeitigem solarthermischem Wärmeangebot gegeben ist. (Paschotta 2012b)

Als Wärmequelle für den Einsatz von Wärmepumpen zur Raumheizung (und -kühlung) kann der Erdboden genutzt werden. Dafür stehen verschiedene technische Systeme zur Verfügung. Erdwärmekollektoren können so z. B. als Flächenkollektoren oder als Erdwärmesonden ausgeführt sein.

Erdwärmekollektoren oder Flächenkollektoren sind horizontal im Erdreich verlegte Wärmeübertrager, die meist aus Kunststoffschläuchen bestehen und von einer frostsicheren Sole (z. B. einem Wasser-Glykol-Gemisch) durchströmt werden. Eine Wärmepumpe entzieht der Sole thermische Energie, wodurch deren Temperatur ein wenig unterhalb der des Erdbodens liegt und bei der Durchströmung des Flächenkollektors Wärme aus dem Boden aufnimmt. Damit der Boden langfristig als Wärmequelle dienen kann, muss dieser wieder Wärme aus seiner Umgebung aufnehmen können. Diese Regeneration erfolgt in der Regel durch Sonneneinstrahlung und Wärmeeintrag durch Regenwasser. Zudem kann über den Flächenkollektor auch Wärme an das Erdreich abgegeben werden, wenn die Wärmepumpe zur Kühlung im Sommer eingesetzt wird. Flächenkollektoren werden häufig in einer Tiefe von 1,5 Metern installiert und können pro 30 bis 60 m² Fläche etwa ein Kilowatt Heizleistung liefern, weshalb sie einen hohen Flächenbedarf haben. (Paschotta 2015)

Erdwärmesonden verlaufen dagegen von der Erdoberfläche mehrere zehn bis hundert Meter senkrecht ins Erdreich hinab und bestehen aus zwei parallelen Rohren, die am unteren Punkt verbunden sind. Darin wird ebenfalls eine Sole verwendet, welche beim Betrieb der Wärmepumpe eine niedrigere Temperatur als das umgebende Erdreich aufweist und dadurch thermische Energie aus diesem aufnimmt. Durch die größere Tiefe schwankt die Bodentemperatur noch weniger als bei Flächenkollektoren, was einen effizienten Betrieb der Wärmepumpe gewährleistet. Bei Erdwärmesonden muss der Schutz des Grundwassers beachtet werden. (Paschotta 2013)

Weitere Wärmequellen für Wärmepumpen können die Umgebungsluft, Wärme aus Oberflächengewässern wie Seen und Flüssen, Abwasser aus Kanälen oder Kläranlagen sowie Abwärme auf niedrigem Temperaturniveau aus verschiedensten Prozessen sein. Je nach Wärmeträgermedium auf der Seite der Wärmequelle und der Wärmesenke spricht man so z. B. von Wasser-Wasser-, Sole-Wasser, Luft-Wasser und Luft-Luft-Wärmepumpen. (Paschotta 2010a)

3.3.4 Solarthermie-Anlage

Solarthermie-Anlagen können in kleinem Maßstab auf Ein- und Mehrfamilienhäusern eingesetzt werden oder als große Freiflächen-Anlagen konzipiert sein. Das Grundprinzip dahinter ist die Erwärmung einer Wärmeträger-Flüssigkeit in den Solarkollektoren durch einfallendes Sonnenlicht. Den Solarkollektoren liegen somit durchströmte Rohre zu Grunde, wobei deren Ertrag an thermischer Energie von der Ausführung der Solarkollektoren abhängt. Unterschieden wird zwischen Röhrenkollektoren und Flachkollektoren. Zudem wird der Ertrag durch eine Glasabdeckung gesteigert, die das Sonnenlicht mit geringen Verlusten passieren lässt, die entstehende Wärme aber im Inneren des Kollektors festhält und so Verluste minimiert. Die Absorption des Sonnenlichts wird darüber hinaus durch entsprechende Beschichtungen der Kollektoren erhöht. Bei Flachkollektoren dienen beschichtete Platten als Absorber, welche die Rohre umschließen und welche als Flachabsorber bezeichnet werden. Bei Röhrenkollektoren sind dagegen die Rohre selbst die Absorber, weshalb diese direkt beschichtet sind. Um Verluste durch thermische Wärmeleitung zu minimieren, werden die Röhren evakuiert. Diese heißen dann Vakuum-Röhrenkollektoren. Durch Spiegel an der Rückwand des Kollektors kann der Ertrag zudem weiter gesteigert werden. Damit sind Kollektorwirkungsgrade von mehr als 80 % möglich. (Christian Münch GmbH o. J.)

Die Einsatzmöglichkeiten von Solarthermie-Anlagen sind vielfältig und die dabei installierten Kollektorflächen können von einzelnen Modulen mit wenigen Quadratmetern, z. B. auf einem Hausdach zur Unterstützung der Warmwasserbereitung, bis hin zu großen Freiflächenanlagen mit bis zu 150.000 m² summierter Kollektorfläche reichen, wie es bei der größten Anlage in Dänemark der Fall ist (Arcon-Sunmark o. J.).

Solarthermie-Anlagen können die gängigen Temperaturniveaus in der Raumwärme- und Warmwasserversorgung gut bereitstellen und die Kollektortemperaturen können sogar mehrere hundert Grad Celsius erreichen (Paschotta 2010c).

Eine Sonderform ist der photovoltaisch-thermische Solarkollektor, welcher Photovoltaik- und Solarthermie-Anlagen miteinander kombiniert. Dabei wird die an der PV-Zelle entstehende Wärme mit einem Wärmeträger-Medium durch Rohre abgeführt, wodurch die Zelle gekühlt wird, wodurch auch der Wirkungsgrad steigt. Die Wärme kann wie bei einer klassischen Solarthermie-Anlage genutzt werden. (Paschotta 2017)

3.3.5 Wärmenetz

Ein Wärmenetz ist ein Rohrleitungsnetz, welches die Wärmeerzeuger mit den Kunden verbindet. Zumeist ist Wasser das Wärmeträgermedium. Die Heizsysteme in den Gebäuden zur Raumbeheizung und Warmwasserbereitung werden vom Wärmenetz mit (heißem) Wasser beliefert, welches aus einer Wärmequelle in der näheren Umgebung stammt. Diese Wärmequelle kann sowohl auf fossilen als auch auf erneuerbaren Energieträgern beruhen. Durch die längere Strecke vom Wärmeerzeuger zum Wärmeabnehmer kommt es zu Wärmeverlusten in den Rohrleitungen. Diese sind unter anderem von den Temperaturen im Netz abhängig. Grundsätzlich lässt sich sagen: Je höher das Temperaturniveau im Netz ist, desto größer sind auch die Wärmeverluste. (kiEMT 2019b)

In einigen WiEfm-Machbarkeitsstudien wurden hohe Temperaturen von 70 °C oder mehr verwendet. Ein weiterer Teil der Machbarkeitsstudien nutzt niedrigere Temperaturen zwischen 20 °C und 70 °C. Bei niedrigen Temperaturen kommt in der Regel eine Wärmepumpe beim Abnehmer zum Einsatz, welche das Wasser vor Ort erwärmt, um die gewünschte Temperatur bereitzustellen. Bei noch niedrigeren Temperaturen von 8 bis 20 °C spricht man von einem kalten Netz, welches auch zur Kühlung von Gebäuden genutzt werden kann. (kiEMT 2019b)

Kalte Netze bedürfen gegenüber klassischen Wärmenetzen keiner Dämmung und können unter Umständen sogar Wärme aus dem umgebenden Boden aufnehmen.

Lund u. a. (2014a) teilt die Nah- und Fernwärmeversorgung in vier Generationen ein. Die zeitliche Einteilung der Generationen gibt den Zeitraum an, in dem das jeweilige System dem gegenwärtigen Stand der Technik entsprach. Die erste Generation beginnt im Jahr 1880, abgelöst durch die zweite Generation ab 1930 und anschließend durch die dritte im Jahr 1980. Die vierte Generation beginnt nach der Einteilung Lunds im Jahr 2020.

Nach Lund u. a. (2014a) ist die erste Generation netzgebundener Wärmeversorgung über Dampf als Wärmeträgermedium und entsprechend hohe Temperaturniveaus charakterisiert. Die zweite Generation verwendet dagegen Wasser auf hohem Druckniveau über 100 °C. In der aktuell üblichen dritten Generation netzgebundener Wärmeversorgung kommt heißes Wasser, oft unter 100 °C, zum Einsatz, welches über vorgefertigte, gedämmte Rohrsysteme verteilt wird. Die vierte Generation von Wärmenetzen zeichnet sich durch niedrigere Temperaturen im Wärmeträgermedium Wasser aus und setzt entsprechend niedrigere Energiebedarfe von Gebäuden sowie zumeist Flächenheizungen voraus. (Lund u. a. 2014a)

Abb. 3-8 gibt eine Übersicht über die vier Generationen der leitungsgebundenen Wärmeversorgung.

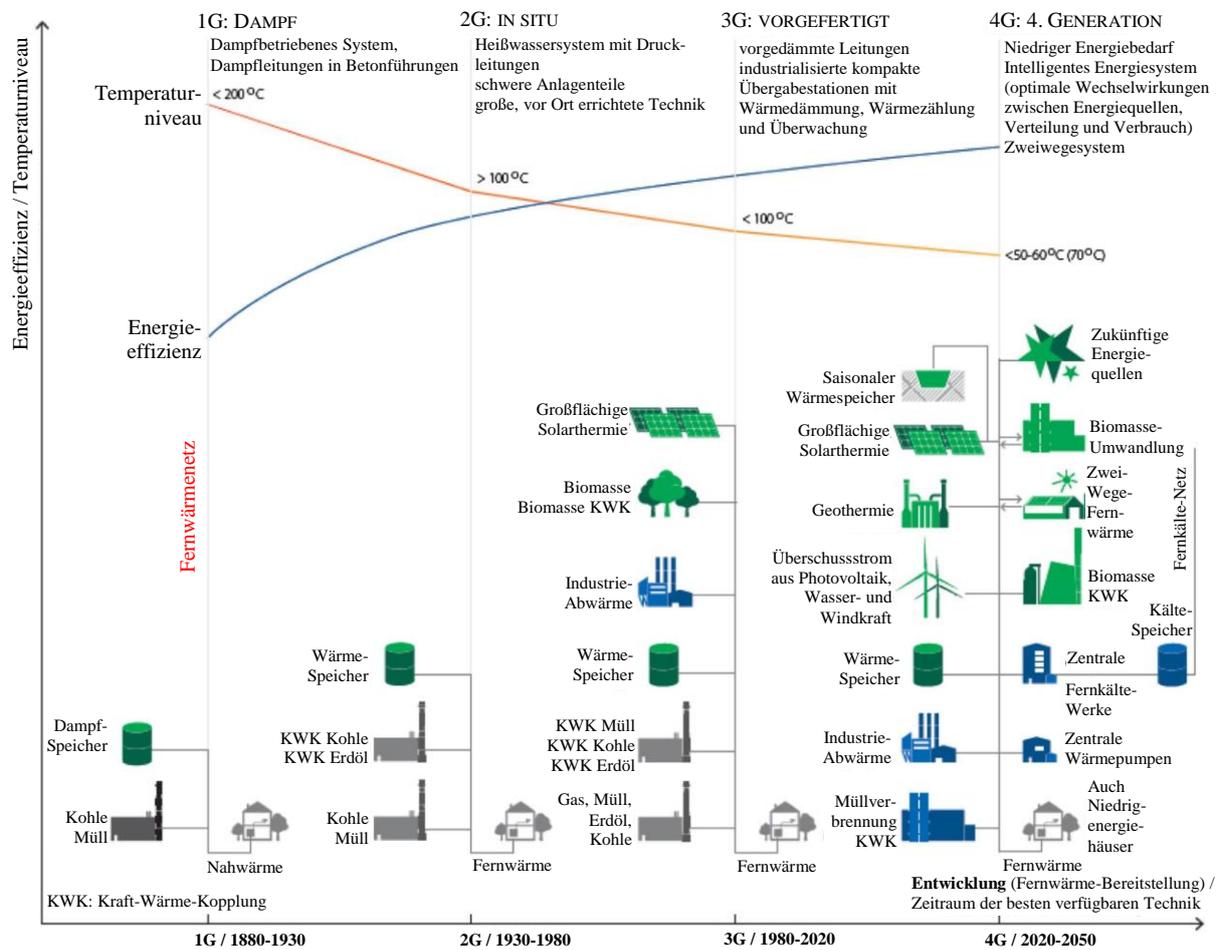


Abb. 3-8: Darstellung und Vergleich der vier Generationen (1G bis 4G) der leitungsgebundenen Wärmeversorgung nach (Lund u. a. 2014a, S. 9)

3.4 Verbrauch, Erzeugung und Speicherung

Gerade bei regenerativen Energiequellen gibt es einen bestimmten Anteil fluktuierender Energieerzeugung, vor allem aus Solarstrahlung und Windkraft. Für den Bereich der Wärme ist die Solarthermie als direkte Wärmequelle hier relevant aber auch Photovoltaik und Windstrom spielen eine nicht unerhebliche Rolle, da diese in Zusammenhang mit Power-to-Heat-Technologien zu berücksichtigen sind. Da sich Wärme besser speichern lässt als Strom, ist auch Power-to-Heat ein geeigneter Ansatz, um einen Teil des überschüssig produzierten Stroms sinnvoll zu nutzen.

3.4.1 Zeitlicher Verlauf des Wärmeverbrauchs

Im Winter wird aufgrund des Raumwärmebedarfs abhängig von der Außentemperatur mehr Wärme benötigt, als im Sommer, wo überwiegend nur die Erwärmung des Trinkwassers benötigt wird. Abb. 3-9 zeigt diese Aufteilung für ein Bestands-Einfamilienhaus.

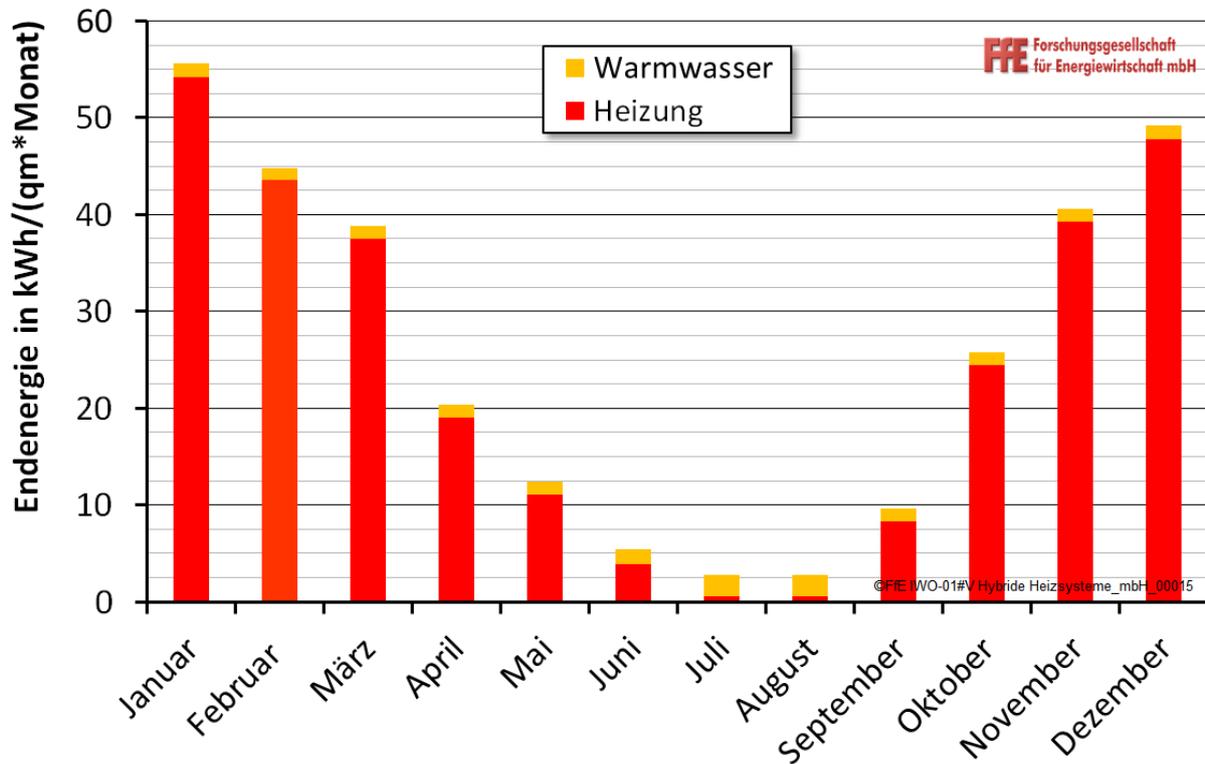


Abb. 3-9: Endenergiebedarf eines Einfamilienhauses aus dem Bestand für Heizung und Warmwasser in monatlicher Auflösung (FfE 2011, S. 12)

Um ein Wärmeversorgungssystem entsprechend ausreichend dimensionieren zu können, muss die Leistung bekannt sein, die benötigt wird, um den Wärmebedarf auch am kältesten Tag des Jahres ausreichend decken zu können (FfE 2011, S. 17). Dazu werden Lastgänge mit stündlicher Auflösung simuliert. Dies geschieht anhand von Wetterdatensätzen für die verschiedenen meteorologischen Regionen Deutschlands, sogenannten Testreferenzjahren, sowie den Wärmeverlust- und -bedarfen der Gebäude. Die rote Linie in Abb. 3-10 zeigt einen solchen chronologischen Jahreslastgang. Dieser wird anschließend absteigend sortiert, woraus sich eine Jahresdauerlinie ergibt, welche unter anderem die maximale Leistung zeigt und auch wie viele Stunden im Jahr diese bereitgestellt werden muss (gelbe und grüne Linie in Abb. 3-10).

Bei der Betrachtung der sortierten Lastkurve (Jahresdauerlinie) in Abb. 3-10 wird deutlich, dass die maximale Leistung nur für einen Bruchteil der Jahresstunden benötigt wird. Dies ist ein üblicher Verlauf solcher Jahresdauerlinien. Bei größeren Wärmeversorgungssystemen wird daher die Wärmeversorgung in klassischen Systemen mit mehreren Anlagen unterschiedlicher

Leistung sichergestellt. Beispielhaft könnte dies so aussehen: Ein erdgas- oder ölbetriebener Spitzenlastkessel mit hoher Leistung deckt die Lastspitzen ab und wird darüber hinaus nicht betrieben. Der mittlere und längste Leistungsbereich wird über ein erdgasbetriebenes Blockheizkraftwerk mit etwas geringerer Leistung versorgt. Der niedrige Leistungsbereich könnte gegebenenfalls über Abwärme versorgt werden.

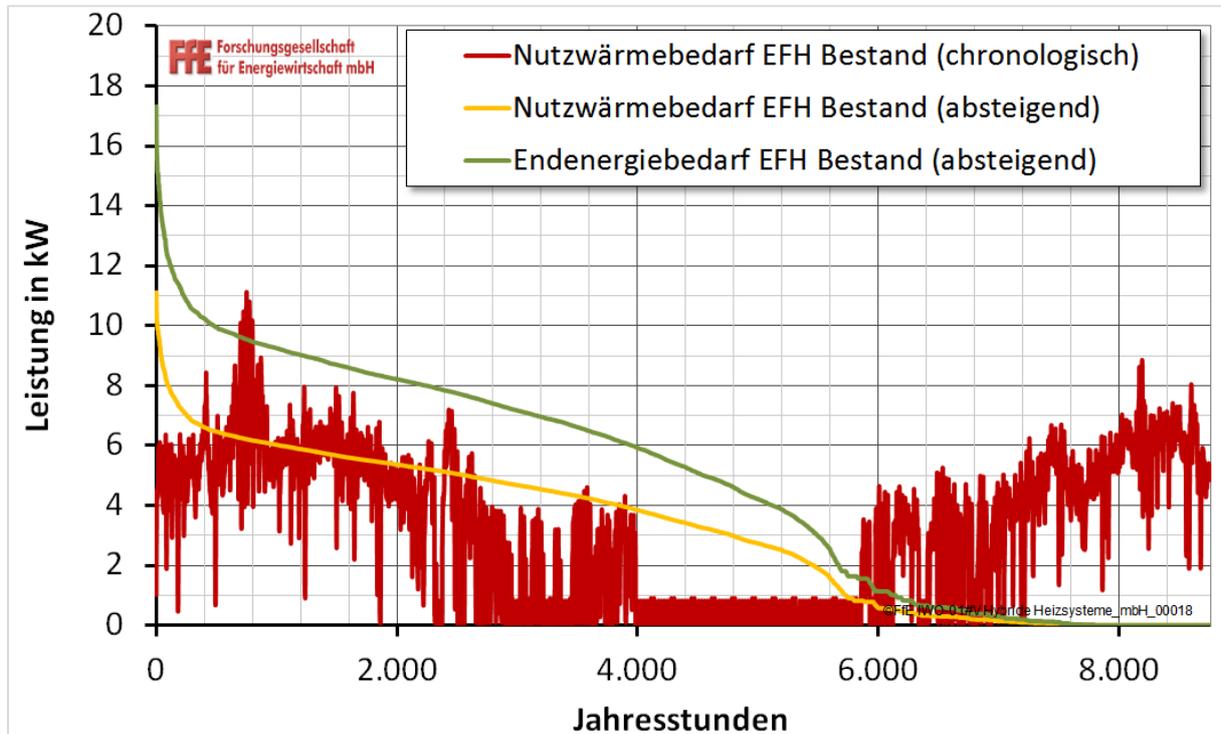


Abb. 3-10: Chronologischer und absteigender Nutzwärmelastgang (normiert für Heizung und Warmwasser) sowie Endenergiebedarf eines bestehenden Einfamilienhauses (EFH) (unsaniert) (FfE 2011, S. 17)

Bei regenerativen Systemen gibt es jedoch einen Anteil fluktuierender Energiequellen, weshalb die Energie nicht immer bei Bedarf direkt abgerufen werden kann. Nachfolgend wird auf den zeitlichen Verlauf der Erzeugung eingegangen.

3.4.2 Zeitlicher Verlauf fluktuierender regenerativer Erzeugung

Die fluktuierenden regenerativen Energiequellen Wind und Solar sind bei Solarthermie direkt und bei Photovoltaik und Windstrom indirekt für einen Teil der regenerativen Wärmebereitstellung verantwortlich. Im Tages- sowie Jahresverlauf schwankt deren Erzeugung. Die Einstrahlungsintensität und die nutzbare Solarenergie sind zeitlich und örtlich unregelmäßig und dabei von verschiedenen Faktoren abhängig, wie der Verschattung durch Bewölkung sowie dem Tag-Nacht-Wechsel und dem standortabhängigen jahreszeitlichen Wechsel wegen der Neigung der Erdachse (Reich u. Reppich 2018, S. 64). Im Sommer ist der Solarertrag in

Deutschland daher deutlich höher als im Winter, wie auch aus den nachfolgenden Abbildungen zu den Strommarktdaten Deutschlands für Wind und Photovoltaik ersichtlich ist. Abb. 3-11 zeigt den Verlauf über das gesamte Jahr 2018 in wöchentlicher Auflösung und Abb. 3-12 stellt den Tagesverlauf der Stromerzeugung aus Wind und Sonne in Deutschland an drei aufeinander folgenden Tagen einmal im Sommer und einmal im Winter gegenüber.

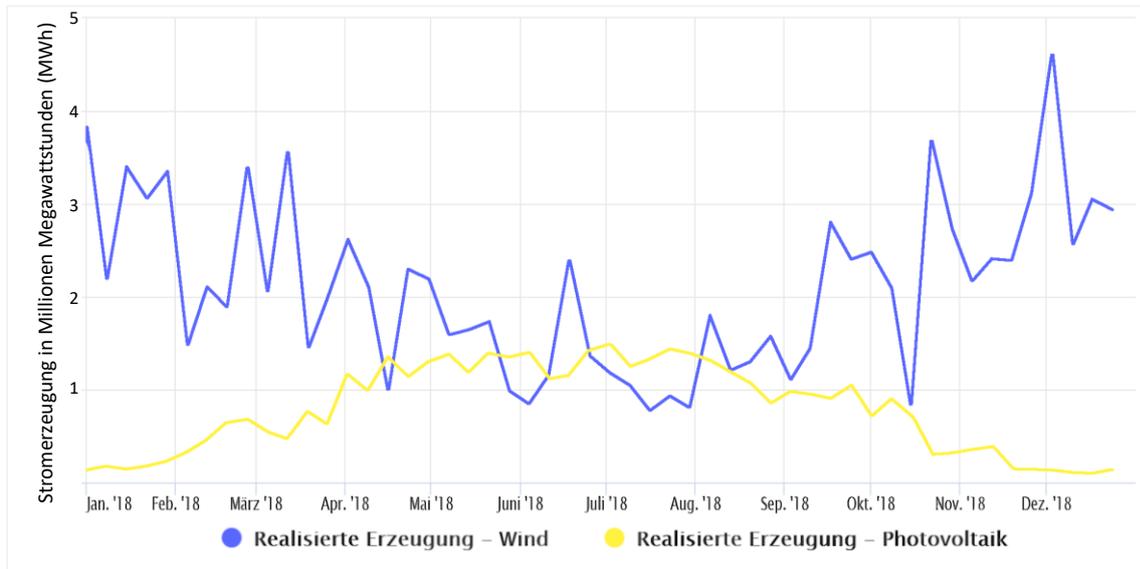


Abb. 3-11: Realisierte Stromerzeugung aus Windkraft und Photovoltaik in Deutschland im Jahr 2018, wöchentliche Auflösung. Nach (BNetzA 2019)

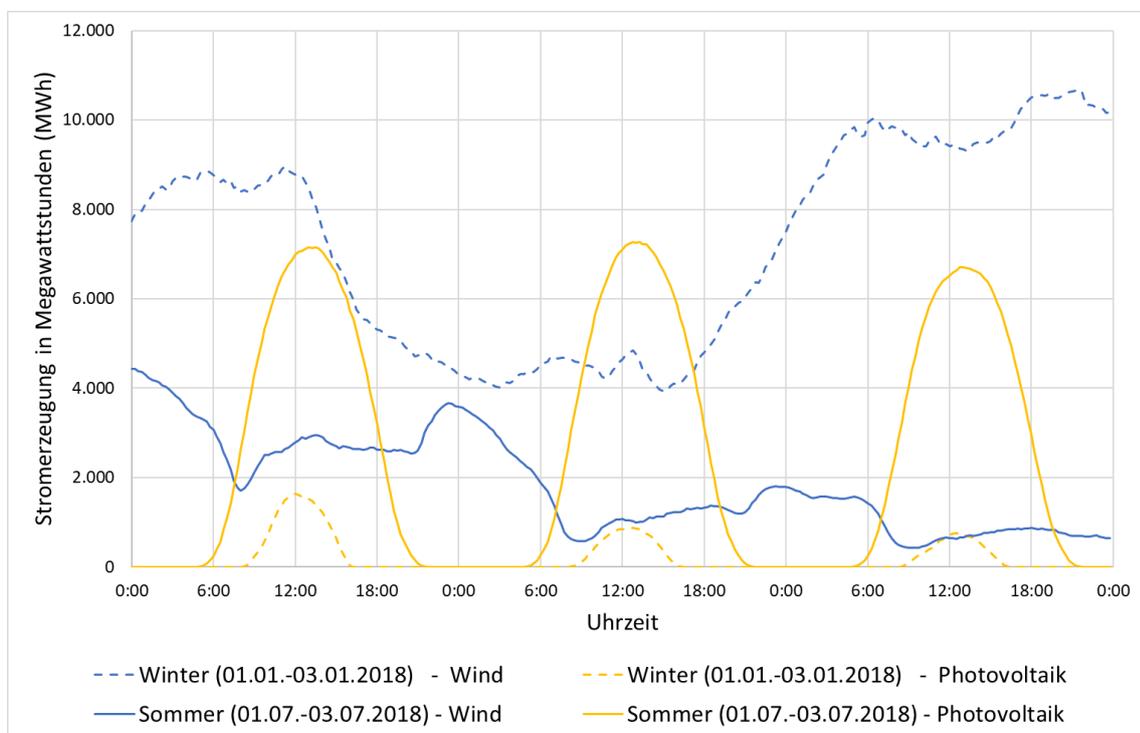


Abb. 3-12: Realisierte Stromerzeugung aus Windkraft und Photovoltaik in Deutschland über drei Winter- und drei Sommertage im Jahr 2018, viertelstündliche Auflösung. Nach (BNetzA 2019)

Hier ist erkennbar, dass der Solarertrag über einen Tag parabelförmig verläuft und zur Mittagszeit seine höchsten Werte erzielt. Auch die Erzeugung von Windstrom unterliegt starken Schwankungen, welche sehr unsted sind und aus deren Verlauf nicht direkt ein Muster ersichtlich ist. Jedoch lässt sich erkennen, dass im Winter tendenziell mehr Stromproduktion aus Windkraft erfolgt, als im Sommer.

3.4.3 Speicherung

Aus den vorangegangenen Abschnitten geht hervor, dass Wärme nicht immer dann benötigt wird, wenn diese an der Quelle erzeugt wird. Für die Solarthermie wird dies auch nochmals in Abb. 3-13 visualisiert.

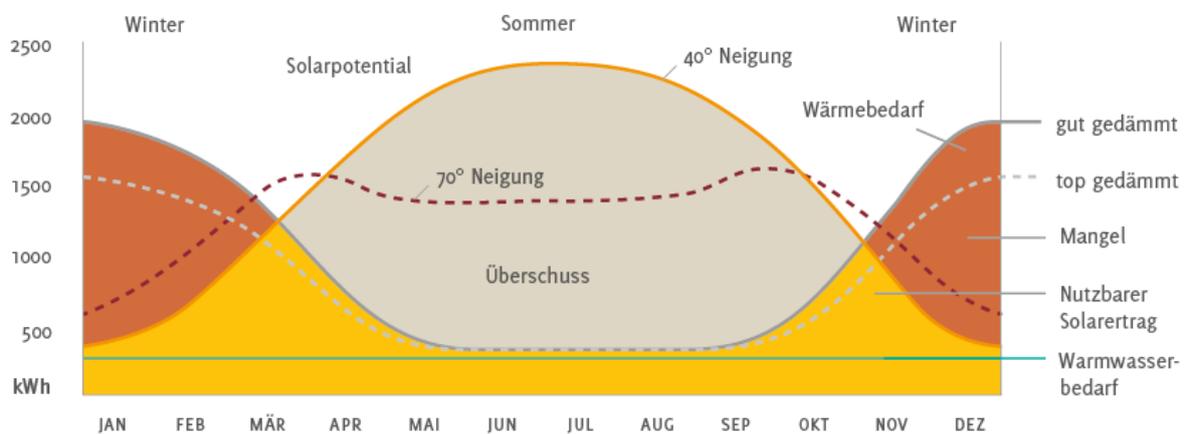


Abb. 3-13: Gegenüberstellung von Solarangebot in Abhängigkeit von der Solarkollektorneigung und Wärmebedarf im jahreszeitlichen Verlauf. (Sonnenhaus-Institut e.V. o. J.)

Die Verknüpfung von Wärmebereitstellung an der Wärmequelle und Wärmenachfrage beim Abnehmer erfordert eine gute Koordination von (Rest-)Wärmeangebot und Wärmenachfrage auf der Basis von passenden Techniken und einer guten Planung von Investitionen in Wärmeverteilnetze. Folgende Techniken gehen unter anderem aus den WiEfm-Machbarkeitsstudien hervor. (kiEMT 2019b)

3.4.3.1 Pufferspeicher

Ein Pufferspeicher dient der kurzzeitigen Speicherung von heißem Wasser in einem Tank. Dies dient z. B. dazu, dass heizungstechnische Anlagen weniger takten oder in Teillast laufen müssen und sorgt für einen effizienten Betrieb vieler Heizungsanlagen oder gleicht tageszeitliche Schwankungen aus. Die Speicher können entweder direkt mit heißem Wasser beladen werden oder indirekt über einen Wärmeübertrager im Speicher. Die speicherbare Wärmemenge

ist vom Speichervolumen und der Temperaturdifferenz der maximalen und minimalen Speichertemperatur abhängig. (Paschotta 2010b)

3.4.3.2 WKO-System / Aquiferspeicher

Der Aquifer-Speicher, auch WKO-System, ist eine Methode, um Energie in Form von Wärme oder Kälte mit Hilfe von Flächenkollektoren oder Erdwärmesonden im (flachen) Boden zu speichern (kiEMT 2019b). Dazu werden zwei Grundwasser-Bohrungen in unterschiedlich tiefen Gesteinsschichten oder in einer Schicht mit gewissem Abstand zueinander angelegt, wobei eine dieser Schichten als Wärmequelle und -speicher dient und die andere als Kältequelle bzw. -speicher. Durchschnittlich liegen WKO-Systeme in einer Tiefe zwischen 20 und 120 Metern (Provincie Drenthe o. J.). Im Heizbetrieb wird das Grundwasser aus der Wärmequelle gepumpt und diesem wird mit einer Wärmepumpe Energie entzogen, um Heizungs- oder Trinkwarmwasser auf die nötige Vorlauftemperatur zu bringen. Das dabei abgekühlte Grundwasser wird anschließend in die Kältequelle im Boden eingeleitet. Im Kühlbetrieb wird der Prozess umgekehrt und Wasser aus der Kältequelle wird – oft ohne den Einsatz einer Wärmepumpe – zur Gebäudekühlung eingesetzt, wobei es sich erwärmt, und anschließend in die Wärmequelle im Boden geleitet. Die Wärmequelle kann auch aus anderen Quellen wieder regeneriert werden, wie z. B. aus Abwasserwärme (mittels Riothermie). Die Regeneration ist vor allem dann zu gewährleisten, wenn mehr Heiz- als Kühlbedarf im Laufe eines Jahres besteht. (Syntraal 2019, S. 12–13)

3.4.3.3 Saisonalspeicher

Eine andere Form der Speicherung in den Machbarkeitsstudien des Projekts WiEfm ist die langzeitige thermische Energiespeicherung. Ein Saisonalspeicher ist ein Speichersystem, bei dem Wärme über das Medium Wasser und bei hoher Temperatur über einen längeren Zeitraum von bis zu sechs Monaten gespeichert und bei Bedarf des Kunden genutzt werden kann. Zum Einsatz kommen Erdbecken-Wärmespeicher und Ecovat-Tanks. Erdbecken-Wärmespeicher sind eher flache, fünf bis 15 Meter tief in den Boden gegrabene Becken mit einer Wärmedämmung zum umgebenden Erdreich und einem schwimmenden, freitragenden oder aufliegenden, ebenfalls gedämmten Deckel und einem Speichervolumen zwischen 1.000 und 70.000 m³ (Solites 2014). Der Ecovat-Speicher ist ein großer, zylindrischer und unterirdischer Tank, welcher durch die Schichtung des Speichermediums Wasser eine Temperaturspanne von 0 °C bis 90 °C erreichen und mit Verlusten von unter 10 % speichern kann (RVO.nl o. J.-a). Das Speichervolumen von realisierten Ecovat-Projekten reicht von 20.000 m³ bis 55.000 m³ (Ecovat 2018).

3.4.3.4 Phasenwechsel-Speicher

In einer anderen Variante eines solchen Speichers kommt kein Wasser, sondern Phasenwechsel-Materialien, sogenannte Phase Change Materials (PCM), zum Einsatz. Diese Materialien, bei denen z. B. Wachse oder Salze verwendet werden, schmelzen oder erstarren bei der Wärmeaufnahme bzw. Wärmeabgabe und können so die Wärme länger halten. (kiEMT 2019b)

3.4.3.5 Eisspeicher

Der Eisspeicher ist im Grunde ebenfalls ein Phasenwechsel-Speicher, bedarf aber keiner speziellen Materialien. Ein Eisspeicher besteht aus einem Wassertank mit Wärmetauscher-Rohren, welcher oberflächennah im Erdreich liegt und ohne Wärmedämmung auskommt. Betrieben wird ein Eisspeicher in Kombination mit einer Wärmepumpe und dient dieser als Wärmequelle. Die Wärmepumpe entzieht dem Wasser thermische Energie, wodurch dieses gefriert. Durch den Phasenwechsel kann die latente Wärme des Wassers genutzt und der Speicher kleiner ausgelegt werden. (Paschotta 2012a)

3.4.3.6 Smart Grid

Ein intelligentes Energienetz wird Smart Grid genannt und nutzt eine mit Kommunikationstechnologie versehene Infrastruktur (Smart Meter), um Angebot und Nachfrage der Wärme aufeinander abzustimmen. (kiEMT 2019b)

3.5 Darstellung von bestehenden Systemen und Ansätzen nachhaltiger Wärmeversorgung

Nachfolgend wird zunächst anhand des Beispiels Dänemark sowie an einer dänischen und einer deutschen Untersuchung ein Blick aus nationaler Perspektive auf die Entwicklung und Ansätze zur Thematik einer nachhaltigen Wärmeversorgung gerichtet. Anschließend werden einige ausgewählte Ansätze zur nachhaltigen Wärmeversorgung weniger Gebäude bis zu Quartieren aus den deutschen und niederländischen Machbarkeitsstudien des WiEfm-Projektes vorgestellt und betrachtet.

3.5.1 Darstellung des Wärmeversorgungssystems in Dänemark

Die Ausrichtung der Wärmeplanung in Dänemark fand bereits 1979 mit dem Wärmeversorgungsgesetz statt, mit dem Ziel, die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu reduzieren. Die Energieversorgung in Dänemark basiert auf einer Zonierung von Versorgungsgebieten, in denen es eine bevorzugte Wärmeversorgungslösung gibt. Die Wahl der Wärmeversorgung

resultiert dabei aus sozioökonomischen und umwelttechnischen Aspekten. Es soll ein höchstmöglicher KWK-Anteil erreicht und eine Konkurrenz zwischen Erdgas- und Fernwärmeversorgung vermieden werden. Dabei ist die Wärmeplanung national initiiert und wird kommunal ausgeführt. Hier herrscht ein natürliches Monopol vor und es gibt eine gegenseitige Verpflichtung von Versorger und Verbraucher zum Anschluss und zur Belieferung. Bei der Planung fällt die Wahl stets auf die anwendungsspezifisch günstigste Alternative. Die Wahl der Wärmeversorgungslösung muss dabei vorteilhaft für die Gesellschaft, den Verbraucher sowie die Versorgungs-Unternehmen sein. Die Einnahmen der dänischen "Stadtwerke" müssen für die Energieversorgung verwendet werden. Die Versorgung basiert dabei entweder auf Erdgas-Netzen, Fernwärme-Netzen oder heutzutage auch auf Wärmepumpen. Die Anpassung des Wärmepreises zugunsten bevorzugter, moderner Technologien und zulasten veralteter und unerwünschter Technologien erfolgt über Energie- und CO₂-Steuern. (Renoth 2019; Duedahl 2019)

Die dänische Fernwärmeversorgung ist ein komplexes Strukturgebilde, welches sich in einem Zeitraum von über 100 Jahren entwickelt hat. Dies hat dazu geführt, dass dieses Modell in Dänemark sehr gut funktioniert. Über die Hälfte des Wärmebedarfs in Dänemark wird durch die Fernwärmeversorgung abgedeckt und zwei Drittel aller dänischen Haushalte werden mit Fernwärme versorgt. In Kopenhagen sind es sogar 98 % aller Häuser. Es gibt momentan etwa 450 Wärmenetze und jedes Jahr kommen etwa 20.000 neue Kunden in der Fernwärme dazu. Die Wärme wird von etwa 400 Fernwärme-Versorgern bereitgestellt, wovon 12,5 % in kommunaler Hand und 85 % in Verbraucherhand sind (Renoth 2019). Die Merkmale eines dänischen Fernwärme-Unternehmens sind seine völlige Transparenz, seine Wettbewerbsfähigkeit gegenüber anderen Versorgungsoptionen und die Ausnutzung der Vorteile des Wettbewerbs am Markt und des natürlichen Monopols zugleich. Ein solches Fernwärme-Unternehmen bietet stets die niedrigsten möglichen Preise, ist direktes oder indirektes öffentliches Eigentum und ist damit auch ein vertrauenswürdigen öffentliches Versorgungs-Unternehmen. Die Investitionspläne sind langfristig, größenordnungsmäßig 40 Jahre. Die dänische Fernwärme wird mittlerweile zu 61 % aus erneuerbaren Energien versorgt, mit steigender Tendenz, und kommt bald ohne die Nutzung von Kohle aus. (Duedahl 2019)

3.5.2 Ansätze erneuerbarer Energie- und Wärmeversorgungssysteme

Nachfolgend werden zwei Studien vorgestellt, welche sich mit einer Umstellung des Energie- bzw. Wärmeversorgungssystems auf erneuerbare Energien befassen.

3.5.2.1 Dänemark

Beim Entwurf von hundertprozentig erneuerbaren Energiesystemen müssen laut Lund u. Mathiesen (2009) drei maßgebliche technologische Veränderungen vollzogen werden. Diese sind Energieeinsparungen auf der Verbraucherseite, Effizienzsteigerungen in der Energieproduktion sowie die Substitution von fossilen Brennstoffen durch verschiedene Quellen erneuerbarer Energie (Lund u. Mathiesen 2009, S. 524). Dabei gibt es zwei maßgebliche Herausforderungen: Zum einen die Integration eines hohen Anteiles fluktuierender Ressourcen in das Energiesystem, v. a. die Stromversorgung, und zum anderen die Einbeziehung des Transport-Sektors in die Strategien. (Lund u. Mathiesen 2009)

Das Ziel des Entwurfs nach Lund u. Mathiesen (2009) ist es, die CO₂-Emissionen bis 2030 um 50 % gegenüber 1990 zu reduzieren und bis 2050 um 100 % zu senken. Das Resultat der Untersuchung ist, dass in Dänemark eine zu 100 % erneuerbare Energieversorgung auf inländischen Ressourcen physikalisch möglich ist. Entscheidend ist dabei, in wie weit das Land entweder überwiegend auf Biomasse-Ressourcen setzen will, was bedeutet, dass gegenwärtig landwirtschaftlich genutzte Flächen miteinbezogen werden, oder überwiegend auf Windkraft setzen will, was einen großen Einsatz von Wasserstoff oder ähnlichen Energieträgern erfordert und zu einer gewissen Ineffizienz in der Systemkonzeption führt. (Lund u. Mathiesen 2009, S. 524)

3.5.2.2 Deutschland

Die 40/40-Strategie des AGFW zielt darauf ab mit einer Wärmeversorgung in 40 % der deutschen Städte, die durchschnittlich zu 40 % über Fernwärme mit einem hohen Anteil erneuerbare Energien bereitgestellt wird, das Erreichen der CO₂-Einsparziele bis 2050 maßgeblich zu unterstützen. Im Zusammenspiel mit der energetischen Gebäudesanierung kann demnach bis 2050 eine achtzigprozentige CO₂-Reduktion gegenüber 1990 erreicht werden (AGFW 2018, S. 29). Die 40/40-Strategie betrachtet die Gemeindekategorien Großstadt, Mittelstadt und Kleinstadt, jedoch keine Landgemeinden, da hier häufig Wärmebedarfsdichte und Wärmebedarf zu gering seien. Die beschriebene Betrachtung bezieht laut AGFW 85 % der Bevölkerung mit ein (AGFW 2018, S. 8). Die Zielgröße der Wärmeversorgung in 40 % der deutschen Städte mit durchschnittlich 40 % Fernwärme aus überwiegend erneuerbaren Energien ist demnach erreichbar, wenn im Jahr 2050 alle Großstädte, 80 % aller Mittelstädte und 60 % aller Kleinstädte über Wärmenetze verfügen. Zudem soll die Fernwärme in den Großstädten 70 %, in den Mittelstädten 35 % und in den Kleinstädten 17 % der gesamten Wärmeversorgung

ausmachen (AGFW 2018, S. 9). Die nötigen Investitionen für den Ausbau der Fernwärmeversorgung erfordern Anreize durch Fördermittel und amortisieren sich nach anfänglicher Wirtschaftlichkeitslücke im Zeitraum zwischen 2030 und 2050, und profitieren letztlich von der Langlebigkeit der Technologie (AGFW 2018, S. 7). Zudem generiert jeder investierte Euro durchschnittlich 60 Cent regionale Wertschöpfung und jede Millionen Euro Umsatz aus dem vorgeschlagenen Ausbau entspricht etwa sieben bis neun Arbeitsplätze in den Kommunen (AGFW 2018, S. 43).

3.5.3 Ansätze für nachhaltige Wärmeversorgungssysteme in Deutschland

Nachfolgend werden die deutschen Machbarkeitsstudien des WiEfm-Projekts auf ihre nachhaltigen Wärmeversorgungslösungen untersucht. Dazu bekommt jede Studie eine Kurzbezeichnung bestehend aus dem Ort, für den die Studie durchgeführt wurde, und einer Nummer, für den Fall, dass mehrere Studien für einen Ort angefertigt wurden. Jede nachhaltige oder teilweise nachhaltige Wärmeversorgungs-Variante wird beschrieben und mit der Kurzbezeichnung der Studie sowie der Nummer der Variante in der Form „Ort_1-V01“ benannt. In Anh. 7 ist die Auswertung in tabellarischer Form zu finden.

3.5.3.1 Machbarkeitsstudie „Solare Biowärme Greven“

Das Konzept der Machbarkeitsstudie „Solare Biowärme Greven“ („Greven_1“) (Energethik 2017) zur Wärmeversorgung eines bestehenden Wohngebiets mit einem jährlichen Wärmebedarf von etwa 10,5 GWh/a (sowie alternativ des Innenstadtgebiets mit einigen öffentlichen Nicht-Wohngebäuden) beruht auf einem Wärmenetz mit einer durchschnittlichen Temperatur von 70 °C, einer Biogasanlage mit flexibilisierten, stromgeführten Biogas-BHKWs, einem saisonalen Erdbecken-Wärmespeicher, einem Pufferspeicher sowie einer großflächigen Solarthermie-Freiflächenanlage (Greven_1-V01). In den verschiedenen Szenarien der Studie wird dabei der solare Deckungsgrad variiert, was sich nach der benötigten Fläche für die Solarthermie-Freiflächenanlage auf die benötigte Wärmemenge aus der Biogasanlage (Biomethan-BHKW) sowie die Größe des Erdbecken-Wärmespeichers auswirkt, jedoch nichts an der Konzeption der Variante ändert.

3.5.3.2 Machbarkeitsstudie Nahwärmenetz Schulzentrum Senden

In der Machbarkeitsstudie für Senden („Senden_1“) (Bode 2018) wurde ein Konzept zur Wärmeversorgung von vier Schulen sowie weiteren, bestehenden und öffentlich genutzten Gebäuden mit einem Hochtemperatur-Nahwärmenetz und dem Einsatz eines

Holzackschnitzel-Kessels oder eines Biomethan-Brennwert-Kessels sowie -BHKWs und zudem die intermittierende Betriebsweise und Beladung von Pufferspeichern entworfen.

Die Heizlasten der Schulgebäude liegen zwischen 130 und 276 kW und der Jahreswärmeverbrauch aller Schulgebäude zusammen liegt bei etwa 1,7 GWh/a. Die Vorlauftemperatur im Versorgungsnetz beträgt 80 °C bis zum Pufferspeicher und 60 °C nach dem Pufferspeicher im Netz der Schule. Die Rücklauftemperatur liegt bei 40 °C.

Die erste Variante (Senden_1-V01) sieht die Kombination aus Holzackschnitzel-Kessel als Grundlastversorgung und Biomethan-Kessel als Spitzenlastversorgung vor. Die zweite Variante (Senden_1-V02) arbeitet mit der Kombination eines Biomethan-BHKWs und eines Biomethan-Brennwertkessels als Grundlastversorgung und eines weiteren Biomethan-Brennwertkessels als Spitzenlastversorgung, welche unabhängig von einer Biogasanlage versorgt werden.

3.5.3.3 Energiekonzept Neubaugebiet „Am Überweg“ Gemeinde Schöppingen

Zur Versorgung eines Neubaugebiets mit 24 Grundstücken und eines bestehenden Gewerbebetriebs sieht das Konzept der Studie „Schöppingen_1“ (energielenker 2018a) als regenerative Versorgungslösung den Bau eines Wärmenetzes vor, in welches überschüssige Wärme aus dem Biogas-BHKW einer oder mehrerer Biogasanlagen eingespeist wird (Schöppinge_1-V01). Dabei wird das Netz mit einer Vorlauftemperatur von mindestens 70 °C betrieben. In einer Heizzentrale sind zudem Spitzenlast- und Reservekessel untergebracht, die mit bilanziellem Biomethan aus dem Erdgasnetz betrieben werden können. In Variante 2 (Schöppinge_1-V02) kommen von der BGA unabhängige BHKWs zum Einsatz, die ebenfalls mit bilanziellem Biomethan aus dem Erdgas-Netz betrieben werden können. Dies ist unter Nachhaltigkeitsaspekten jedoch als zweitrangige Lösungsmöglichkeit zu betrachten.

3.5.3.4 Untersuchung von alternativen Wärmeversorgungspotenzialen im Industriepark Nord.Westfalen

Die Studie „Coesfeld_1“ (DFIC 2017) befasst sich mit der Untersuchung von alternativen Wärmeversorgungspotenzialen im Industriepark Nord.Westfalen in Coesfeld. Als vorrangig haben sich zwei dezentrale und zwei zentrale Wärmeversorgungslösungen herausgestellt. Die erste dezentrale Variante (Coesfeld_1-V01) ist die Eigenversorgung eines Industriebetriebs über ein BHKW, welches mit Pflanzenöl oder ähnlichen Reststoffen aus der eigenen Altfettaufbereitung/-verwertung betrieben wird. Eine zweite Variante (Coesfeld_1-V02), die jedoch einen anderen Betrieb als Wärmegroßverbraucher betrifft, ist die Eigenversorgung über einen Holzackschnitzel-Kessel mit Holzackschnitzeln aus dem städtischen Grünschnitt. Diese

könnte darüber hinaus auf eine zentrale Versorgung ausgeweitet werden, wenn das vorhandene Nahwärmenetz mitbenutzt wird und eine größere Menge des anfallenden städtischen Grünschnitts genutzt wird. Die nächste, nur zum Teil nachhaltige Variante (Coesfeld_1-V03) ist die zentrale Versorgung von bis zu 10 Industriebetrieben auf dem Gelände über ein klassisches Nahwärmenetz, versorgt durch das BHKW einer Biogasanlage sowie eines bestehenden Erdgas-BHKWs und Erdgas-Gebläsebrennern als Spitzenlast- und Reservekessel. Die Erdgas-Anlagen können mit bilanziellem Biomethan aus dem Erdgas-Netz versorgt werden. In einer vierten, ebenfalls zentralen Variante (Coesfeld_1-V04) werden die Industriebetriebe aus einem großen Holzackschnitzel-Kessel mit Holzackschnitzeln (HHS) aus dem städtischen Grünschnitt sowie der Überschuss-Wärme aus dem BGA-BHKW versorgt. Dazu kommen wie zuvor die genannten Spitzenlast-/Reservekessel. Bei einer Flexibilisierung der Biogas-Verstromung können die Vollbenutzungsstunden des BGA-BHKWs reduziert und die HHS-Anlage größer dimensioniert und somit ein höherer Anteil an städtischem Grünschnitt genutzt werden.

3.5.3.5 Machbarkeitsstudie Parador – Seeger Engineering

In der Studie „Coesfeld_2“ (Seeger 2018) werden die Reststoffe eines Holzverarbeitenden Unternehmens, vornehmlich Holzspäne und -stäube sowie Stückholz zur Raum- und Prozess-Wärmeversorgung verwendet. Für die Ausweitung der Verwendung des Restholzes soll eine holzbefeuerte Einkessel- oder Zweikessel-Anlage zum Einsatz kommen, um Prozesswärme (Thermoöl) mit einer Vorlauftemperatur von maximal 260 °C und Warmwasser für Raumwärme und Trinkwasser-Erwärmung mit einer Vorlauftemperatur von maximal 100 °C zur Verfügung stellen zu können (Coesfeld_2-V01). Dabei wurden mehrere Varianten in der Studie betrachtet, das Grundprinzip bleibt jedoch gleich.

3.5.3.6 Energiekonzept Neubaugebiet „ehemaliges Schmeing-Gelände“

Die Studie „Borken_1“ (energielenker 2018b) untersucht die Wärmeversorgung eines Neubaugebiets mit 65 Grundstücken und etwa 145 Wohneinheiten. Dabei kommen mehrere nachhaltige Wärmeversorgungslösungen in Betracht. Variante 1 (Borken_1-V01) ist die Nutzung der Überschusswärme aus dem Biogas-BHKW einer nahen Biogasanlage in einem klassischen Wärmenetz mit Pufferspeicher (und vermutlich mit Einbindung eines Spitzenlastkessels). Die zweite Variante (Borken_1-V02) besteht in der Nutzung von Abwärme eines Holzvergaser-BHKWs, welches von einem ansässigen Unternehmen betrieben wird in Kombination mit einem zu errichtenden Holzackschnitzelkessel und Pufferspeichern, ebenfalls über ein klassisches Wärmenetz. In Variante 3 (Borken_1-V03) wird dagegen ein

kaltes Wärmenetz aus einem zentral angelegtem Erdsondenfeld mit 69 Sonden in Tiefen von 100 bis 200 Metern gespeist, aus welchem über dezentrale Wärmepumpen in jedem Gebäude Energie zur Raumheizung und Warmwasserbereitung entzogen wird. Die Gebäude verfügen über Pufferspeicher und können das kalte Wärmenetz ebenfalls (direkt oder über die WP) zum Kühlen nutzen. Für einen nachhaltigen Betrieb müssen die Wärmepumpen mit Ökostrom oder besser noch über hauseigene PV-Anlagen betrieben werden.

3.5.3.7 Machbarkeitsstudie Nahwärmenetz Ibbenbüren

In der Studie „Ibbenbüren_1“ (pbr NETZenergie 2019) geht es um die Versorgung von Nichtwohngebäuden der öffentlichen Hand, wie Schulen und Rathausgebäude über ein klassisches Nahwärmenetz mit Vorlauftemperaturen von 80 °C. Die Wohngebäude im entsprechenden Bereich können sich ebenfalls an das Nahwärmenetz anschließen. In einem Szenario kommt ein Schwimmbad zur Versorgung hinzu. Die Wärmeversorgung wird dabei über ein System aus Solarthermie-Anlagen auf den verfügbaren Dachflächen, einem mit städtischem Laub und Grünschnitt sowie HHS betriebenen Biomasse-Kessel sowie einem Holzvergaser gewährleistet. Dazu kommen dezentrale Pufferspeicher sowie ein zentraler Langzeit-Wärmespeicher und ein BHKW zum Betrieb einer Trocknungs- und Brikettierungsanlage, die Laub und Grünschnitt zur Nutzung aufbereitet (Ibbenbüren_1-V01).

3.5.3.8 Machbarkeitsstudie Wärmenetz Ladbergen

Die Studie „Ladbergen_1“ (iNeG 2018) untersucht die Versorgung im Bestand von 18 Abnehmern bestehend aus kommunalen sowie kirchlichen Trägern und einigen gewerblichen Gebäuden und in einer anderen Variante von 6 Abnehmern aus dem Gewerbe über ein klassisches Wärmenetz. Dabei werden drei nachhaltige Versorgungslösungen betrachtet. In Variante 1 (Ladbergen_1-V01) wird dabei gesamte benötigte Wärme von einer Biogasanlage eingekauft und von dieser in das Wärmenetz eingespeist. In Variante 2 (Ladbergen_1-V02) kommt ein bestehender Holzpellet-Kessel zum Einsatz, welcher von einem BHKW unterstützt wird. Da hier Erdgas eingesetzt wird, besteht die Möglichkeit, Biomethan aus dem Netz zu beziehen. Zur Spitzenlastabdeckung kommt ein ebenfalls auf Erdgas basierender Spitzenlast-Kessel zum Einsatz. Daher ist diese Variante nur teilweise nachhaltig. Die dritte Variante (Ladbergen_1-V03) soll sechs Abnehmer eines Gewerbegebiets über ein klassisches Nahwärmenetz mit Abwärme versorgen, welche über einen Pufferspeicher zwischengespeichert werden kann.

3.5.3.9 Wärmeversorgungskonzept für die Konversionsfläche der General-Wever-Kaserne („Eschendorfer Aue“)

Die Studie „Rheine_1“ (Gertec 2017) betrachtet diverse Wärmeversorgungslösungen für das geplante Neubaugebiet mit Einfamilien- und Mehrfamilienhäusern, sodass auch nachhaltige Wärmeversorgungslösungen sowohl zentraler als auch dezentraler Systeme darunter sind. Für die zentrale Versorgung von MFH und Stadtvillen (Rheine_1-V01) ist die Nahwärmeversorgung über ein klassisches Netz mit einem Holzpellet-Kessel sowie einem Pufferspeicher in der Heizzentrale möglich. Die Versorgung von Einfamilienhäusern und Doppelhaushälften kann in Variante 2 (Rheine_01-V02) über ein Niedertemperatur-Nahwärmenetz mit einer Vorlauftemperatur von 45 °C erfolgen. Dazu wird ein Erdwärmesondenfeld mit bis zu 250 Erdsonden mit einer Tiefe von bis zu 90 Metern angelegt und eine zentrale Wärmepumpe erzeugt daraus die Temperatur von 45 °C. Die dritte Variante (Rheine_1-V03) nutzt kalte Nahwärme aus Erdwärmesonden und -kollektoren sowie dezentrale Wärmepumpen in allen Gebäuden zur Versorgung neuer EFH. Die dezentralen Lösungen sind die Versorgung mittels Luft-Wärmepumpe, ggf. unterstützt durch eine PV-Anlage (Rheine_1-V04), die Versorgung mittels Erdsonden-Wärmepumpe, ebenso ggf. unterstützt durch eine PV-Anlage (Rheine_1-V05), sowie die Versorgung mittels Holzpellet-Heizung (Rheine_1-V06).

3.5.3.10 Wärmeversorgung eines Neubaugebietes in Warendorf

Die Studie „Warendorf_1“ (EA Lippe 2017) untersucht ein Neubaugebiet mit 18 Grundstücken und 30 Gebäuden mit insgesamt 80 Wohneinheiten. In den dezentralen Varianten 1-3 (Warendorf_1-V01 bis Warendorf_1-V03) kommen die gleichen Techniken zum Einsatz, wie in der vorangegangenen Studie (Rheine_1-V04 bis Rheine_1-V06). Die zentrale Variante (Warendorf_1-V04) sieht ein Nahwärmenetz vor, welches über einen Holzpellet-Kessel gespeist wird und über einen Pufferspeicher verfügt. Hier ist kein Redundanzkessel nötig. Für den Sommerbetrieb ist ein Solarfeld denkbar. In einer weiteren zentralen Versorgungs-Variante (Warendorf_1-V05) kommt ein Nahwärmenetz zum Einsatz, welches vorrangig über Holzhackschnitzel beheizt wird. Hier ist ein Spitzenlastkessel (Erdgas) nötig und eine Kombination mit einer Solarthermie-Freiflächen-Anlage ist denkbar. Zudem wird ein kleines BHKW betrieben, um eine gewisse Grundlast zu decken.

3.5.3.11 Energiekonzept Warendorf In de Brinke

In der Studie „Warendorf_2“ (iNeG 2017b) soll ein Neubaugebiet mit 181 Grundstücken und 358 Wohneinheiten in EFH, RH und MFH sowie einem Kindergarten und einer Feuerwehr-Stelle mit Wärme versorgt werden. In einer nachhaltigen Variante (Warendorf_2-V01)

kommen zwei HHS-Kessel und ein Spitzenlast-Kessel zum Einsatz, welche die Gebäude über ein klassisches Wärmenetz versorgen. Zudem wird ein großer 100 m³ Pufferspeicher eingesetzt. Die anderen Varianten dieser Studie arbeiten mit Erdgas-BHKWs und werden daher hier nicht weiter erläutert.

3.5.3.12 Konzeptstudie Nahwärmeversorgung Dorfbauerschaft Hoetmar

Die Studie „Warendorf_3“ (iNeG 2017a) untersucht die Wärmeversorgung von Wohngebäuden und Hofstellen in einer Dorfbauerschaft (7 Abnehmer) sowie in einem erweiterten Szenario die zusätzliche Versorgung von einem bestehenden Wohngebiet. In der ersten nachhaltigen Variante (Warendorf_3-V01) kommt ein HHS-Kessel zum Einsatz, welche ggf. durch eine Solarthermie-Anlage ergänzt wird und bei der als Redundanz- und Spitzenlast-Versorgung zwei bestehende Ölkessel eingesetzt sind. Im erweiterten Szenario (Warendorf_3-V02) wird die Abwärme aus einer nahegelegenen Biogasanlage eingekauft.

3.5.4 Ansätze für nachhaltige Wärmeversorgungssysteme in den Niederlanden

Nachfolgend werden 12 niederländische Machbarkeitsstudien des WiEfm-Projekts auf ihre nachhaltigen Wärmeversorgungslösungen untersucht. In Anh. 7 ist die Auswertung in tabellarischer Form zu finden.

3.5.4.1 Warmtenet Kerschoten – Onderzoek mogelijkheden realisatie

In der Studie „Apeldoorn_1“ (Over Morgen 2019) geht es um die Versorgung von sechs großen Anschlussnehmern mit insgesamt 1.251 Wohneinheitenäquivalenten. Dies sind zwei Pflegeheime, eine Schulgemeinschaft, zwei Wohnanlagen und ein neuer Appartementkomplex. In einem weiteren Szenario wurde der Anschluss vieler weiterer Einzelabnehmer (Häuser und Wohnungen) miteinbezogen. Es besteht bereits ein Wärmenetz in der Nähe, welches aus einem Klärgas-BHKW versorgt wird. Für das neu geplante Netz (Apeldoorn_1-V01) soll ebenfalls das Abwärmepotenzial der Kläranlage, zwei vorhandene Biomasse-(Holz-)Kessel sowie ein erdgasbetriebener Spitzenlastkessel eingesetzt werden. Die verfügbare Wärme aus der Kläranlage kommt dabei einerseits aus der überschüssigen Wärme des mit Klärgas betriebenen BHKWs sowie aus einer zentralen Wärmepumpe mit 1,5 MW thermischer Leistung, welche dem aufbereiteten Abwasser aus der Kläranlage Energie entzieht und diese mit 70 °C dem Wärmenetz bereitstellt. Damit die 70 °C des Wärmenetzes ausreichen, müssen einige Immobilien saniert und zusätzlich gedämmt werden.

3.5.4.2 Duurzame warmte – Zolderpark

In „Beuningen_1“ (ZEBRA B.V. 2018) geht es um eine Bürofläche im zweiten Stock eines Gebäudes, oberhalb eines Supermarktes sowie Wohneinheiten. Die Wärmeversorgung soll von Gas umgestellt werden auf eine nachhaltige Lösung und der Strombezug aus dem Netz soll reduziert werden. Dazu soll eine Wärmepumpe zum Einsatz kommen, die als Wärmequelle die Wärme aus sogenannten Booster-Modulen nutzt, welche mit einer PV-Anlage kombiniert sind, und in einem Pufferspeicher zwischengespeichert wird. Die PV-Module sollen den Strom zum Betrieb der Wärmepumpe liefern und so soll die Bürofläche bilanziell energieneutral mit Strom und Wärme versorgt werden können. Durch die Kühlung der PV-Module mit dem thermischen Verstärker (Booster-Module) steigert sich die Effizienz der PV-Module um 10 %. Die Booster oder thermischen Verstärker entsprechen rückseitig an den PV-Modulen angebrachten Wärmeübertragern und damit dem Prinzip des photovoltaisch-thermischen Solarkollektors. Im Gebäude wird die Wärme über klassische Radiator-Heizkörper abgegeben. Durch die Kombination mit einem WKO-System (Aquifer-Speicher) lässt sich ein höherer thermischer Deckungsgrad erreichen.

3.5.4.3 Uitbreiding Multatulilaan Culemborg – Globale haalbaarheidsstudie

Die Ausweitung eines bestehenden Wärmenetzes zur Versorgung von vier Schulgebäuden, einem Gewerkschaftsgebäude, einem Schwimmbad sowie einer Moschee ist Gegenstand der Studie „Culemborg_1“ (Liandon 2019). Dazu soll das Abwasser einer nahegelegenen Kläranlage als Wärmequelle genutzt werden und mit einer Wärmepumpe erhitzt werden. Im Wärmenetz soll eine Vorlauftemperatur von 60 °C garantiert werden. Ein Pufferspeicher ist auch Teil des Systems. Soll die Wärmepumpe kleiner (als 1 MW) ausgelegt werden, ist eine Nachheizung über einen elektrischen oder mit Biomasse/-gas betriebenen Kessel notwendig.

3.5.4.4 Potentieel thermische energie uit oppervlaktewater (TEO) – Beheergebied van Waterschap Rijn en IJssel

In dieser Studie „Doetichem_1“ (IF Technology 2017) wird das Potenzial der thermischen Energie aus Oberflächenwasser (TEO) im Rijn-IJssel-Managementgebiet mit 22 Gemeinden untersucht. Dabei wird unterteilt in Wärme- und Kältegewinnung aus Wasserläufen und Teichen bzw. flachen/kleinen Seen, aus tiefen Seen sowie aus bzw. an Konstruktionen wie Dämmen und Pumpstationen. Für Wasserläufe und Teiche ist dabei ein Konzept in Kombination mit einem WKO-System und einer Wärmepumpe vorgesehen (Doetichem_1-V01). Im Sommer wird mit der TEO die Trinkwassererwärmung bewerkstelligt. Über einen Wärmeübertrager wird Wasser aus der Kältequelle des WKO erwärmt und in die Wärmequelle des WKO

geleitet und damit die Kühlung der Gebäude sowie die Speicherung des warmen Oberflächenwassers im WKO-System erreicht. Das Oberflächenwasser kühlt um 3 K ab. Im Winter wird das warme Grundwasser aus dem WKO-System mit Unterstützung einer Wärmepumpe zur Beheizung der Gebäude verwendet. Zudem wird die Kälte des Oberflächenwassers in der Kältequelle des WKO-Systems gespeichert. Dabei wird das Oberflächenwasser um 3 K erwärmt. Wird diese Variante an Dämmen oder Pumpstationen eingesetzt, so bedarf es keiner zusätzlichen Pumpen und ein thermischer Kurzschluss kann vermieden werden. In Variante 2 (Doetichem_1-V02) werden tiefe Gewässer mit mehr als 18 Metern Tiefe zur ganzjährigen Kälteversorgung verwendet. Die Schichtung dieser Gewässer liefert ganzjährig Wasser mit Temperaturen von vier bis acht Grad Celsius aus den tiefen Schichten, welches zur Kühlung entnommen, über einen Wärmetauscher geleitet und an der Oberfläche zurück in das Gewässer gepumpt wird. Hier ist keine zusätzliche Speicherung notwendig.

3.5.4.5 Warmtestudie Calluna zwembad en wijk van de toekomst gemeente Ermelo

In der Studie „Ermelo_1“ (Sweco 2018) geht es um die Wärmeversorgung für ein neu gebautes Sportzentrum sowie eines Schwimmbads. Zudem wird ein kleines Wohngebiet in der Nähe betrachtet. Zur Versorgung kommen drei Varianten in Betracht. Die erste Variante (Ermelo_1-V01) sieht ein Hochtemperatur-Wärmenetz (VL 70 – 90 °C) vor, welches über einen Biomasse-Kessel mit Holz aus dem städtischen Grünschnitt und einen Langzeit-Ecovat-Wärmespeicher versorgt wird. In der zweiten Variante (Ermelo_1-V02) kommt ein kaltes Nahwärmenetz mit Riothermie (Abwasserkanal-Wärmetauscher) und WKO zum Einsatz. In den Häusern und im Schwimmbad kommen Wasser-Wasser-Wärmepumpen zum Einsatz. Zudem werden zwei Luft-Wasser-Wärmepumpen als Redundanz installiert. Soll nur das Schwimmbad beheizt werden, kann an Stelle der Riothermie auch Solarthermie verwendet werden (Ermelo_1_V03).

3.5.4.6 Evaluatie van de mogelijkheden die de ondergrond van de gemeente Hengelo biedt voor warmtetoepassingen – een quickscan

Die Studie „Hengelo_1“ (Ekwadraat BV 2019) untersucht die Möglichkeiten der Geothermienutzung in Hengelo zur Einspeisung in ein bestehendes Wärmenetz. Dieses wird bisher durch Restwärme betrieben. Die Geothermiepotenziale in Hengelo (Hengelo_1-V01) sind jedoch recht gering und wirtschaftlich nicht gut darstellbar. Als Alternative zur Nutzung des Untergrundes wurde die Möglichkeit eines WKO-Systems untersucht, bei dem ein Aquifer-Speicher eine Temperatur von 14-15 °C liefert und eine Wärmepumpe diese auf 40 °C erhöht (Hen-

gelo_1-V02). Dies kann mit der Wärme- und Kältengewinnung aus Oberflächengewässern kombiniert werden (Hengelo_1-V03). Auch die Kombination des Wärmepumpen-WKO-Systems mit einer zentralen Solarthermie-Anlage, welche die Speichertemperatur anhebt, ist denkbar (Hengelo_1-V04). Das bestehende System bezieht Restwärme von Nouryon, einem Produzenten von Chemierzeugnissen.

3.5.4.7 Resultaat en rapporten onderzoek naar haalbaarheid collectief warmtenet op het Industrierrein 't Panhuis.

Die Studie „Kesteren_1“ (HMAP BV 2017) (kiEMT 2019a, 34-35) befasst sich mit der nachhaltigen Wärmeversorgung eines Gewerbegebiets, vorrangig der Verkaufs- und Ausstellungsflächen der Firma Daimtech. In einem Konzept (Kesteren_1-V01) wird ein PCM-Speicher zusammen mit einer Absorptionswärmepumpe und Solarthermie- sowie PV-Modulen betrieben. Die Wärme für die Absorptionswärmepumpe wird über den Dampf aus dem Prozess einer Futtermittelfabrik bereitgestellt. Zudem kommt ein Elektrokessel als Spitzenlastversorgung hinzu. Die Versorgung erfolgt über ein Wärmenetz und über eine Klimaanlage.

3.5.4.8 Bewonersonderzoek Warmte voor Wolfskuil

Die Studie „Nijmegen_1“ (Warmte.nu 2018) behandelt eine Bewohnerbefragung zur Umstellung der Wärmeversorgung in einem Viertel, konkrete Wärmeversorgungslösungen werden nicht näher erläutert.

3.5.4.9 Duurzame energievoorziening door Biogashub Noord Deurningen / Lattrop-Breklenkamp

Die Untersuchung „Noord-Deurningen_1“ (CCS 2019) behandelt den Auf- bzw. Ausbau eines Biogas-Netzwerks. Wärmeversorgungslösungen werden nicht näher erläutert, es kann jedoch geschlussfolgert werden, dass das Biogas aus dem Netzwerk in Biogas-Kesseln oder -BHKWs eingesetzt wird.

3.5.4.10 Haalbaarheid riothermie – Matchpoint Putten

In der Studie „Putten_1“ (Syntraal 2019) geht es um die Wärmeversorgung von einem Neubaugebiet mit 28 energieeffizienten Gebäuden und die Frage, ob diese aus Abwärme aus dem Abwasserkanal (Riothermie) versorgt werden können. In einer ersten Variante (Putten_1-V01) kommen Abwasser-Wärmetauscher im Kanal zum Einsatz und speisen ein kaltes Wärmenetz. Jedes Gebäude verfügt über dezentrale Wärmepumpen, um das Wasser auf die gewünschte Temperatur zu bringen. Pufferspeicher und ggf. PV-Anlagen können dezentral installiert werden. Die zweite Variante (Putten_1-V02) unterscheidet sich davon durch eine

teilweise zentrale Erwärmung des Wassers aus dem kalten Netz für einzelne Häuserblöcke mit einer größeren Wärmepumpe und einem zweiten Hochtemperatur-Netz, sodass die Häuser nur noch eine Wärmeübergabestation benötigen und noch nicht unter das niederländische Wärmegesetz (ab zehn Abnehmern gilt eine leitungsgebundene Wärmeversorgung als Wärmenetz) fallen. In der dritten Variante (Putten_1-V03) erwärmt eine zentrale Groß-Wärmepumpe das Wasser direkt auf die gewünschte Temperatur und verteilt es über ein Mitteltemperatur-Netz für Heizungszwecke und ein Hochtemperaturnetz für Warmwasser. Hier wird ggf. eine Reservelösung benötigt. Eine weitere Variante (Putten_1-V04) ist der Einsatz von Erdwärmesonden mit Wärmepumpen für die Gebäude.

3.5.4.11 Afkoppelen gasnet Benedenbuurt, gemeente Wageningen

In der Studie „Wageningen_1“ (Tauw 2017) geht es darum zu untersuchen, ob im Rahmen von Kanalarbeiten die Wärmeversorgung des bestehenden Wohngebiets nachhaltig gestaltet werden kann und ein Wärmenetz gebaut werden soll. Dazu gibt es verschiedene Szenarien. In einer ersten Variante (Wageningen_1-V01) kommt ein kaltes Wärmenetz mit 12 °C Vorlauftemperatur zum Einsatz, welches über ein WKO-System (mit WP) versorgt wird. Dieses wiederum wird aus Oberflächenwasser des nahegelegenen Flusses gespeist. Dazu sind dezentrale Wärmepumpen und Pufferspeicher mit Warmwasser-Boilern in allen Häusern erforderlich, um das Heizungswasser auf 45 °C zu erwärmen bzw. das Trinkwarmwasser weiter zu erhitzen. In der zweiten Variante (Wageningen_1-V02) kommt ein Mitteltemperatur-Wärmenetz (gedämmt) mit 50 °C zum Einsatz, welches durch eine zentrale Wärmepumpe aus dem WKO-System gespeist wird. Dieses wird im Sommer durch Oberflächenwasser regeneriert. Die Häuser benötigen zudem einen Pufferspeicher mit Warmwasser-Boiler. Alternativ (Wageningen_1-V03) wird das WKO-System im Sommer über Außenluft mit Wärme versorgt. Ebenso kann anstelle des WKO ein Ecovat-Langzeit-Wärmespeicher eingesetzt werden (Wageningen_1-V04). Ganz ohne zentralen Langzeit-Speicher können auch mehrere zentrale Luft-Wasser-Wärmepumpen zur direkten Erhitzung des Wassers im MT-Netz auf 50 °C eingesetzt werden (Wageningen_1-V05). Die letzte untersuchte Variante (Wageningen_1-V06) ist der Einsatz eines Hochtemperatur-Wärmenetzes (70 °C) mit WKO-System (versorgt über Außenluft im Sommer) und zentraler Großwärmepumpe, die das Wasser auf 70 °C erhitzt. In den Häusern gibt es Pufferspeicher und eine Spitzenlast-Versorgung.

3.5.4.12 Evaluatie duurzame restwarmte Wezep – inzake de WiEfm-voucher

Die Studie „Wezep_1“ (Tauw 2018) untersucht die Möglichkeit der Abwärmenutzung einer kartoffelverarbeitenden Fabrik zur Beheizung eines Schwimmbades. Die Fabrik leitet täglich

1.400 m³ Abwasser mit einer Temperatur von 30 bis 32 °C in den Abwasserkanal. Zur Versorgung des Schwimmbades wurde der Abwasserkanal der Fabrik am Schwimmbad entlang verlegt. Das Abwasser wird zunächst in ein Pufferbecken am Schwimmbad geleitet. Dort wird ihm über einen Wärmetauscher die Wärme entzogen, welche anschließend mit einer Wärmepumpe für das Schwimmbad nutzbar gemacht wird. Der Wärmetauscher wurde speziell dafür entworfen und besteht aus drei in Reihe geschalteten Teilen. Dadurch wird der Temperaturunterschied zwischen Vorlauf und Medium reduziert und die Wärmepumpe kann mit einer höheren Effizienz und geringerem Stromeinsatz arbeiten. Abschließend wird das abgekühlte Abwasser wieder in den Kanal zurückgeleitet. Der Puffer garantiert die Versorgung auch am Wochenende, während die Fabrik stillsteht.

3.6 Faktoren nachhaltiger Wärmeversorgungssysteme

Für ein Konzept zum standardisierten Entwurf und Vergleich nachhaltiger Wärmeversorgungssysteme müssen Kriterien zur Bewertung von Energiesystemen sowie die Eingangsparameter für die Planung von Wärmeversorgungssystemen betrachtet werden.

3.6.1 Bewertungskriterien von Energiesystemen

Mit Bewertungskriterien soll ein Vergleich von regenerativen Energiesystemen untereinander und gegenüber konventionellen Energiesystemen ermöglicht werden. Dabei müssen die Vergleichsmethoden passen und Vergleichsparameter dürfen nicht isoliert hervorgehoben werden. Für einen Vergleich von Technologien ist entscheidend, dass diese die gleiche Art von End- oder Nutzenergie (z. B. Strom, Wärme) bereitstellen. (Reich u. Reppich 2018, S. 31)

Eine Auswahl von Bewertungskriterien für nachhaltige Wärmeversorgungssysteme wurde Reich u. Reppich (2018, S. 31–60), Zech (2015, S. 40, 75-76, 80), kiEMT (2019b), Saxion (2019), FH Münster (2018b) und FH Münster (2019) entnommen.

Reich u. Reppich (2018) teilen die Aspekte zur Bewertung von Energiesystemen hauptsächlich auf in technische, energetische, ökonomische und ökologische Bewertungskriterien. Diese sind in Anh. 8 dargestellt.

Zech (2015) geht es dabei um eine umfassende Betrachtung und Bewertung von Energieversorgungstechnologien. Dafür nutzt er die Methode der multikriteriellen Entscheidungsanalyse sowie die Ermittlung sozialer Kosten zur Bewertung von Technologien zur Wärmeerzeugung in Bezug auf die Nachhaltigkeit. (Zech 2015, S. 39)

Für die multikriterielle Entscheidungsanalyse hat Zech 17 Indikatoren in den Bereichen der ökologischen, ökonomischen und sozialen Aspekte entwickelt. Diese sind in Anh. 9 dargestellt.

Die Methode der sozialen Kosten als zweite Bewertungsmethode der Nachhaltigkeit von regenerativen Wärmeversorgungstechnologien umfasst bei Zech (2015) einerseits die privaten Kosten einer Technologie, wie Investitionskosten und laufende Kosten für Anschaffung, Betrieb, Instandhaltung sowie Rückbau und Entsorgung. Andererseits werden die externen Kosten mitberücksichtigt, wie z. B. die Schadenswirkung auf Umwelt und menschliche Gesundheit. Die externen Kosten führt Zech auf Emissionen in die Luft zurück. Diese werden entsprechend ihrer Schadenswirkung monetär gewichtet und ermöglichen somit eine Vergleichbarkeit. Anh. 10 zeigt die von Zech berücksichtigten Kategorien. (Zech 2015, S. 75–76)

kiEMT (2019b), Saxion (2019), FH Münster (2018b) und FH Münster (2019) befassen sich vor allem mit der Bewertung und Charakterisierung von Wärmenetzen und den dazu gehörenden Wärmeerzeugern, die im Rahmen des WiEfm-Projektes untersucht worden sind. Aus Saxion (2019) geht eine Tabelle zur Charakterisierung von Wärmenetzen hervor. Diese zeigt unter anderem die wichtigsten technischen Parameter mit denen ein Netz charakterisiert werden kann.

Die Tab. 3-3 zeigt die daraus ausgewählten Bewertungskriterien. Diese sollen nachfolgend erläutert werden und sind für eine zukünftige Entscheidung zwischen Wärmeversorgungsalternativen hilfreich. Eine Auswahl von Wärmeversorgungsalternativen anhand der erläuterten Bewertungskriterien ist jedoch kein Bestandteil dieser Arbeit.

Tab. 3-3: Kriterien zur Bewertung und zum Vergleich von Wärmeversorgungssystemen

Technisch-energetisch	Ökologisch	Ökonomisch	Wärmenetz-spezifisch
Systemeffizienz	Primärenergiefaktor	Wärmepreis	Anschlussdichte
Gesamtleistung	Emissionsfaktor	Wirtschaftlichkeit nach VDI 2067	Kapitalgebundene Kosten
Technische Lebensdauer	Versauerungspotenzial		Verbrauchsgebundene Kosten
Jahresnutzungsgrad	Feinstaub (direkt)		Betriebsgebundene Kosten
			Sonstige Kosten
			Temperaturniveau und -spreizung
			Netzverluste
			Anzahl der Anschlüsse
			Gesamtlänge der Rohrleitungen

Die qualitative Bewertung der Technologien nach Kosten, Maßstab und Kontext, welche von kiEMT (2019b) in Tab. 3-4 vorgenommen wurde, wird anschließend separat betrachtet.

3.6.1.1 Technisch-energetisch

Systemeffizienz

Die Systemeffizienz gibt an, welchen Anteil die letztendlich nutzbare Energie, z. B. Wärme und Strom, an der insgesamt eingesetzten Brennstoffenergie und elektrischen Energie ist. Zu beachten ist, dass stets der Brennwert der eingesetzten Energieträger betrachtet werden muss. Je höher der Wert der Systemeffizienz ist, desto besser. Das theoretische Maximum ist 100 %. (FH Münster 2019, S. 7)

Gesamtleistung

Die thermische Gesamtleistung ist ein Maß für die Leistungsfähigkeit und Größe des Energiesystems und gibt Auskunft über den Wärmebedarf der Abnehmer.

Technische Lebensdauer

Die technische Lebensdauer gibt den Zeitraum an, in welchem ein Wärmeversorgungssystem seine Aufgabe ohne Einschränkung erfüllt, bevor es grundlegend modernisiert, ersetzt oder stillgelegt und zurückgebaut wird. Während dieser Zeit fallen Wartungsarbeiten aufgrund von Verschleiß und Alterung an. Die technische Lebensdauer wird in Jahren angegeben. (Reich u. Reppich 2018, S. 37)

Jahresnutzungsgrad

Der Jahresnutzungsgrad ist der Quotient aus der in einem Jahr abgegebenen Endenergie und der in diesem Zeitraum zugeführten Primärenergie und dient so der Bewertung des Energieumwandlungsprozesses. Der Jahresnutzungsgrad wird in Prozent angegeben und liegt zwischen den theoretischen Grenzen 0 % und 100 %. (Reich u. Reppich 2018, S. 38)

3.6.1.2 Ökologisch

Primärenergiefaktor

Der Primärenergiefaktor gibt die Menge fossiler Primärenergie an, welche entlang der gesamten Prozesskette pro Einheit nutzbarer Wärmemenge eingesetzt wird (FH Münster 2019, S. 7). Ein niedriger Primärenergiefaktor (das theoretische Optimum ist Null) ist anzustreben. Zur Ermittlung des Primärenergiefaktors gibt es unterschiedliche Methoden, wie z. B. die nach AGFW-Arbeitsblatt FW 309-1, welche auf der Anrechnung von Strom aus KWK-Anlagen, welcher ins Netz eingespeist wird, beruht (AGFW 2014).

Emissionsfaktor

Der Emissionsfaktor gibt die klimarelevanten Emissionen entlang der gesamten Prozesskette pro Einheit nutzbarer Wärme an z. B. in kg CO₂-Äquivalenten pro MWh Wärme. Somit weist er auf den Einsatz fossiler Brennstoffe hin. Ebenso wie beim Primärenergiefaktor ist hier ein besonders niedriger Wert nahe oder gleich Null am besten. Ein komplett nachhaltiges System hat einen Emissionsfaktor von Null. (FH Münster 2018b, S. 12, 2019, S. 7)

Saxion (2019) gibt eine andere, CO₂-Index genannte, Kennzahl für die CO₂-Emissionen an. Diese bezieht nicht die verursachten CO₂-Emissionen auf die bereitgestellte Wärme- und Strommenge, sondern auf die CO₂-Emissionen einer Referenzsituation für Wärme und Strom. Diese ist in den Niederlanden die dezentrale, individuelle Wärmebereitstellung über einen individuellen HR-107-Gaskessel sowie getrennten Strombezug aus einem Kraftwerk. Im Optimum liegt auch hier der Kennwert bei null. (Saxion 2019, S. 29)

Versauerungspotenzial (SO₂-Äquivalent-Emissionen)

Die Umweltwirkung durch die Versauerung von Luft, Boden und Wasser durch z. B. Schwefeldioxid (SO₂), Stickoxide (NO_x) und Schwefelwasserstoff (H₂S) werden als massenbezogene SO₂-Äquivalente z. B. in g_{SO₂-Äq.}/kWh_{Wärme} angegeben. (Zech 2015, S. 48)

Feinstaub (direkt)

Als Feinstaub werden Partikel bezeichnet, die eine gewisse Zeit in der Luft verweilen und durch Einatmen gesundheitliche Schäden verursachen können. Viele Anlagen zur Wärmeversorgung verursachen Staubemissionen. Bei den erneuerbaren Energien sind dies vor allem Biomassefeuerungsanlagen.

Daten zur Erhebung der Kennwerte „CO₂-Äquivalente“, „SO₂-Äquivalente“ und „Feinstaub“ können der GEMIS-Datenbank entnommen werden (Zech 2015, S. 46–51).

3.6.1.3 Ökonomisch

Wärmepreis

Der Wärmepreis ist der Preis, den die Abnehmer pro Kilowattstunde Wärme bezahlen und sollte alle Kosten enthalten, die für die Wärmebereitstellung anfallen. Wie sich der Wärmepreis im Detail berechnet, ist unter anderem von den eingesetzten Energieträgern, Anlagen und Technologien abhängig. (FH Münster 2019, S. 7–8)

Wirtschaftlichkeit nach VDI 2067

Die VDI-Richtlinie VDI 2067-1 ermöglicht die Berechnung der Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen und umfasst kapitalgebundene Kosten, verbrauchsgebundene Kosten, betriebsgebundene Kosten sowie sonstige Kosten. Die Summe dieser Kosten ermöglicht die Angabe privater Kosten des Wärmekunden in Euro pro Jahr. (Zech 2015, S. 82–83)

3.6.1.4 Wärmenetz-spezifisch

Anschlussdichte

Als Anschlussdichte, Wärmelinien- oder Wärmebelegungsdichte wird die jährlich abgenommene Wärmemenge eines Wärmenetzes bezogen auf die Gesamtlänge der Rohrleitungen bezeichnet. Dieser Wert wird dann z. B. in MWh/(m · a) angegeben. Grundsätzlich ist zu erwarten, dass die Wärmeverluste im Netz umso niedriger sind, je höher die Anschlussdichte ist, jedoch gibt es auch weitere Faktoren, welche die Netzverluste beeinflussen, weshalb auch Netze mit niedriger Anschlussdichte eine hohe Effizienz und geringe Netzverluste aufweisen können. (FH Münster 2018b, S. 10–11; Saxion 2019, S. 3)

Temperaturniveau und Temperaturspreizung

Das Temperaturniveau bezeichnet die Höhe der Vor- und Rücklauftemperaturen. Ein hohes Temperaturniveau begünstigt höhere Wärmeverluste und bedeutet mehr finanziellen und materialtechnischen Aufwand um diese Verluste zu begrenzen.

Die Temperaturspreizung ist die Differenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur im Wärmenetz und dient als Indikator dafür, wie effizient die Anschlussnehmer die Wärme abnehmen. Eine niedrige Temperaturspreizung in Netzen mit hoher Temperatur weist tendenziell auf höhere Netzverluste hin. (FH Münster 2018b)

Netzverluste

Die Netzverluste ergeben sich aus den Energieverlusten des Wärmenetzes bezogen auf die in das Netz eingespeiste Energiemenge und werden in Prozent angegeben. Bedeutend für die Netzverluste sind die zuvor erwähnten Faktoren Anschlussdichte und Temperaturspreizung. Weitere Faktoren für den Wärmeverlust im Netz sind das Temperaturniveau, die Stärke der Rohrdämmung, sowie der Rohrlängendurchmesser (Saxion 2019, S. 3).

Anschlussquote

Die Anschlussquote gibt den Anteil der an ein Wärmenetz angeschlossenen Gebäude an der Gesamtzahl aller Gebäude im Versorgungsgebiet an.

Größe des Wärmenetzes (Anzahl der Anschlüsse und Gesamtlänge der Rohrleitungen)

Die absolute Zahl der Anschlüsse sowie die Gesamtlänge des Wärmenetzes sind ein Maß für die Größe des Wärmenetzes. Die Gesamtlänge des Netzes hat grundsätzlich auch einen Einfluss auf die Netzverluste.

3.6.1.5 Qualitative Bewertung der Technologien aus den Machbarkeitsstudien

Der Bericht von kiEMT (2019b) enthält auch eine Bewertungen der eingesetzten Heiztechnologien aus den Machbarkeitsstudien des Projekts WiEfm, woraus sich Faktoren für die Bewertung ableiten lassen. Die nachfolgende Tab. 3-4 zeigt die Bewertung der im Rahmen der WiEfm-Machbarkeitsstudien untersuchten Wärmetechniken auf qualitativer Ebene. Daraus geht hervor, dass die Kosten, der Maßstab und der Kontext der Wärmeversorgungslösung relevant für die Bewertung von bestimmten Szenarien sind. Auch zeigt sich, dass die Faktoren sich gegenseitig beeinflussen. So haben Kontext und Maßstab direkten Einfluss auf die finanziellen Rahmenbedingungen.

Tab. 3-4: Bewertung der Wärmetechniken WiEfm-Machbarkeitsstudien. (kiEMT 2019b)

Wärmequelle Wärmenetz	finanziell	Maßstab	Kontext
Restwärme	Die kundennahe Restwärme ist schnell wirtschaftlich attraktiv	Erfolgreicher bei mehreren Quellen und Kunden	Abhängig von Temperatur und Volumen der Quelle
Wärme aus Abwasser (Riothermie)	Geringere Investitionskosten bei anstehenden Kanalarbeiten	Nur auf Quartiersebene finanziell machbar	Anwendbar an Stellen, an denen der Kanal durchströmt wird
Wärme-Kälte-Speicher (WKO)	Abhängig von der Kombination mit Wärmequelle oder Wärmepumpe	Anwendbar im kleinen und mittleren Bereich	Stark abhängig von der Notwendigkeit der Kühlung
Erdwärmesonden	Abhängig von Boden und Größe finanziell attraktiv	Anwendbar im kleinen und mittleren Bereich	Abhängig vom Boden und den schon vorhandenen Sonden im Gebiet
Erdwärme (tiefe Geoth.)	Hohe Investitionskosten	Mittlerer oder großer Maßstab finanziell attraktiv	Abhängig von der Tiefe und ausreichendem Wasser
Biomasse	Finanziell attraktiv in Gebieten mit viel Schnittholz/Altholz	In verschiedenen Größenordnungen möglich	Abhängig von der Holzversorgung, Bedenken hinsichtlich der Luftqualität
Solarenergie	Finanziell attraktiv als Ergänzung zu anderen Quellen	Anwendbar im kleinen und mittleren Bereich	Abhängig von der Sonne, Unregelmäßigkeit. Speicherung wichtig
Biogas	Finanziell attraktiv in einem Gebiet mit bestehenden Gasleitungen	In verschiedenen Größenordnungen möglich durch Kopplung mehrerer Quellen	Abhängig von der Umgebung mit Landwirten mit Biogasanlagen

3.6.2 Eingangsparmeter zur Auswahl des Wärmeversorgungssystems

Zur Auswahl und Auslegung geeigneter Technik für die Wärmeversorgung ist der voraussichtliche oder gegenwärtige Jahreswärmebedarf sowie der Verlauf des Wärmebedarfs und der dafür

notwendigen Leistung im Laufe eines Jahres notwendig. Diese Parameter können Erfahrungswerte sein oder über die Gebäudetypologie und das Gebäudealter sowie die geografische Lage abgeschätzt oder detaillierter mit einer Heizlastberechnung nach DIN EN 12831 ermittelt werden. Der Wärme-Hot-Spot-Karte des WiEfm-Projekts liegen Berechnungen zur Abschätzung des Wärmeverbrauchs zugrunde, welche als Datenbasis dienen können (FH Münster 2019, S. 11–15). Für die Dimensionierung und die erforderliche Leistung von Anlagen zur Wärmeversorgung wird eine geordnete Jahresdauerlinie verwendet (Saxion 2019, S. 11). Sofern es nicht wirtschaftlich ist, die gesamte Wärme von einer in der Anschaffung häufig kostenintensiveren, regenerativ betriebenen Anlage bereitstellen zu lassen, ist es möglich nur 80 bis 90 % des Wärmebedarfs durch diese zu decken und für die Spitzenlast zusätzlich einen gasbefeuerten Kessel aufzustellen (Saxion 2019, S. 12), welcher dann vorzugsweise mit Biomethan betrieben wird.

Bei einem Wärmenetz werden nicht alle Anschlüsse zur gleichen Zeit genutzt, was sich über den Gleichzeitigkeitsfaktor ausdrückt. Die effektiv zu installierende Gesamtleistung liegt daher unter der Summe der Anschlussleistungen. Zur Ermittlung der effektiven Leistung wird die Summe der Anschlussleistungen mit dem Gleichzeitigkeitsfaktor multipliziert. Dieser kann bei Wärmenetzen mit 0,8 angenommen werden. (UBA 2013, S. 39–41)

Bei geplanter zentraler Versorgung ohne bestehende Infrastruktur ist die Länge der Rohrleitungen für Wärmeversorgungsnetze wichtig, um Netzverluste zu ermitteln, die sich wiederum auf die benötigte Wärmemenge und -leistung auswirken, die bereitgestellt werden muss. Dazu ist die Kenntnis über die räumliche Lage der Abnehmer zueinander und zu den Wärmeeinspeisepunkten wichtig. Diese Festlegung kann am unkompliziertesten über ein Kartentool erfolgen. Die Netzverluste hängen neben der Länge der Rohrleitungen vom Temperaturniveau im Wärmenetz, der Temperatur des umgebenden Erdreichs sowie dem Wärmedurchgangskoeffizienten der Leitungen und damit dem Material und der Dämmung ab. (UBA 2013, S. 40)

Um die Einbindung von solarthermischen oder photovoltaischen Anlagen geeignet darstellen zu können, ist die nutzbare solare Einstrahlung im Jahresverlauf bedeutend. Diese hängt von der geographischen Lage sowie den dort verfügbaren Flächen und Ausrichtungsmöglichkeiten für die Anlagen ab. Auch hierfür gibt es Berechnungstools und Kartentools, wie das Solarkataster für Nordrhein-Westfalen zur Ermittlung geeigneter Dachflächen (LANUV 2019).

Für die Nutzung des Untergrunds zur Bereitstellung und Speicherung von Wärme (z. B.) mittels WKO sind verschiedene Faktoren relevant, wie die Beschaffenheit des Untergrunds und ob es

Einschränkungen durch Schutzgebiete (Grundwasserschutzgebiet, Naturschutzgebiet, usw.) gibt. Ob WKO möglich ist, kann in den Niederlanden mit einem Kartentool überprüft werden (RVO.nl o. J.-c). In Nordrhein-Westfalen stellt z. B. der geologische Dienst eine Online-Karte bereit, welche die Eignung für geothermische Nutzung darstellt (GD NRW o. J.).

Der Einsatz und die Größe von thermischen Speichern hängt von den Unterschieden zwischen Wärme- und Leistungsbedarf der Abnehmer sowie möglicher Wärme- und Leistungsbereitstellung der Wärmeerzeuger zu jeder Stunde des Jahres ab. Zur Simulation dieser Lastgänge müssen die oben genannten Parameter beachtet werden. Das Programm Sophena von C.A.R.M.E.N. e.V. ermöglicht eine Berechnung von Wärmeversorgungs-Lösungen mit unterschiedlichen Abnehmern und Energiequellen (C.A.R.M.E.N. e. V. 2019).

Die Verfügbarkeit von Abwärmequellen ist ein weiterer wichtiger und standortabhängiger Parameter, welcher jedoch schwer darzustellen ist. Ein Projekt, dass diese Abwärme nutzbar machen will ist ReUseHeat (ReUseHeat 2017).

Auch die Verfügbarkeit von Grünschnitt und Restholz in der Region ist ein relevanter Faktor für den Wärmepreis von Biomasse-Kesseln. Die Ermittlung der Potenziale ist dabei von den lokalen Akteuren abhängig.

Die energetischen Potenziale von Oberflächengewässern wurden im Rahmen des WiEfm-Projekts in einer Machbarkeitsstudie für das niederländische Rijn-IJssel-Gebiet ermittelt (IF Technology 2017) und steht auf der Projektwebseite als statische Karte zur Verfügung (FH Münster 2018a) sowie als interaktive Karte auf der Seite des Wasserverbands Rijn en IJssel (WRIJ 2018). Weitere Karten zur Nutzung von Oberflächengewässern auf niederländischer Seite stellen RVO.nl (o. J.-b) mit dem WarmteAtlas und Inenergie u. ROM3D (2019) mit einer Studie und Karte für Gebiete im Norden und Osten der Niederlande bereit.

4 ERGEBNISSE

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Untersuchung der Machbarkeitsstudien erläutert. Dabei werden die verschiedenen Varianten nachhaltiger Wärmeversorgungssysteme charakterisiert, die sich daraus abgeleitet haben. Anschließend wird ein Ansatz zur Darstellung und zum Entwurf der vorgestellten nachhaltigen Wärmeversorgungssysteme vorgestellt und erläutert.

4.1 Szenarien nachhaltiger Wärmeversorgungssysteme in der EUREGIO

Anhand der Analyse der Wärmeversorgungslösungen, die in Kapitel 3.5 untersucht wurden, werden im Folgenden charakteristische Systeme vorgestellt. Diese werden in zentrale, netzgebundene Systeme und dezentrale Einzelversorgungssysteme unterteilt.

4.1.1 Zentrale, netzgebundene Systeme

Als zentrale, netzgebundene Systeme werden alle Systeme bezeichnet, die ein Rohrleitungsnetz einsetzen. Dieses kann gedämmt sein, wie bei Hoch-, Mittel- oder Niedertemperatur-Systemen, oder auch ohne Dämmung auskommen, wie bei den kalten Wärmenetzen.

4.1.1.1 Hochtemperatur-Systeme

Bei nachhaltigen Hochtemperatursystemen mit Temperaturen im Vorlauf von 70 bis 100 °C ist als Ergebnis der Auswertungen aus Kapitel 3.5 festzustellen, dass sehr häufig Biomasse- oder Biogas-Wärmeerzeuger zum Einsatz kommen. Diese können hohe Temperaturen bereitstellen und sind im Falle von Biogas oder Biomethan auch sehr flexibel an- und abfahrbar. Darüber hinaus sind Solarthermie-Anlagen ebenfalls gut in Hochtemperatursysteme integrierbar, zumeist mit einem entsprechenden Wärmespeicher. Auch verschiedene Abwärmequellen aus industriellen Prozessen stellen ein ausreichend hohes Temperaturniveau für diese Systeme bereit. Selten bei diesem hohen Temperaturniveau eingesetzt, aber technisch verfügbar, sind zentrale Groß-Wärmepumpen.

Hauptkomponente Biomasse- oder Biogas-Wärmeerzeuger

Klassische Wärmenetze mit Temperaturen im Vorlauf von durchschnittlich 70 °C (und z. T. bis 90 °C und darüber) werden bei der nachhaltigen Versorgung zumeist über Biomasse- oder Biogas-Erzeuger als Hauptkomponente versorgt. Dies sind Biomasse-Kessel wie Holzhackschnitzel-Kessel und Holzpellet-Kessel. Als Biomasse dient oft städtischer Grünschnitt. Auch Laub kann nach Brikettierung in einer speziellen Anlage der Biomassefeuerung zugeführt werden. Ebenso wurden Holzspäne und -stäube aus Holzverarbeitenden Betrieben eingesetzt.

Biogas-Erzeuger sind häufig Biogas- bzw. Biomethan-BHKWs von Biogasanlagen. Teilweise werden diese auch unabhängig von Biogasanlagen betrieben und sind seltener auch als reine Biogas- bzw. Biomethan-Kessel ausgeführt. Biomethan-Kessel eignen sich zudem als Spitzenlast- oder Reserve-Kessel, wobei hier das Biomethan zumeist nur bilanziell aus dem Erdgas-Netz bezogen wird. Ebenso können Holzvergaser-BHKWs oder Klärgas-BHKWs eingesetzt werden. Das Klärgas stammt dabei aus den Abwasser-Aufbereitungsprozessen der städtischen Kläranlagen.

Da die Wärme auf einem hohen Temperaturniveau vorliegt, kann diese gut zur Beheizung und Warmwasserbereitung von Wohn- und Nichtwohngebäuden im Bestand mit geringer Dämmstufe eingesetzt werden. Auch Neubauten werden mit entsprechenden Anlagen versorgt. Ebenso ist die Prozesswärmeerzeugung mit Anlagen, die Biomasse oder Biomethan nutzen, möglich, soll hier jedoch nicht näher betrachtet werden.

Kombination mit zentraler Solarthermie-Anlage und Langzeit-Wärmespeicher

Die Kombination dieser Kessel und BHKWs mit zentralen großen Solarthermie-Anlagen ist dabei gut möglich und sorgt für geringere Laufzeiten der Biomasse-/Biogasanlagen, sodass diese bei richtiger Auslegung im Sommer ganz stillstehen können. Dabei ist der Einsatz großer Pufferspeicher und häufig auch saisonaler Erdbecken-Wärmespeicher oder anderer Langzeit-Wärmespeicher (z. B. Ecovat) wichtig, um Lastspitzen auszugleichen, einen gleichmäßigeren Betrieb der Anlagen zu gewährleisten und einen Teil der im Sommer anfallenden, jedoch nicht benötigten solaren Wärme im Winter nutzen zu können.

Industrie-Abwärme

Liegt Abwärme aus Industrieprozessen auf einem entsprechend hohen Temperaturniveau und kontinuierlich genug vor, kann diese mit einem klassischen Wärmenetz auch zur Warmwasser- und Raumwärmeversorgung verwendet werden.

Hochtemperatur-Wärmepumpe in Kombination mit Ecovat oder WKO

Auch der Einsatz spezieller Hochtemperatur-Wärmepumpen kann Temperaturen von 70 bis 90 °C bereitstellen und dabei beispielsweise Wärme aus einem WKO-System nutzen oder in einer Kaskade mit Außenluft-Wärmepumpen das Wasser im oberen Teil eines Ecovats auf 90 °C erhitzen. Zumeist werden Wärmepumpen im Mittel- oder Niedertemperatur-Bereich eingesetzt, wie im nachfolgenden Abschnitt beschrieben.

4.1.1.2 Mitteltemperatur- und Niedertemperatur-Systeme

Wärmenetze, die Vorlauftemperaturen von 60 °C, 50 °C oder 40 °C haben, fallen in die Kategorie der Mittel- bis Niedertemperatur-Wärmenetze. Hier kommen in den Machbarkeitsstudien überwiegend Wärmepumpen-Systeme mit zentralen (Groß-)Wärmepumpen, unterschiedlichen Wärmequellen sowie verschiedenen Speichersystemen zum Einsatz.

WKO-Systeme (Aquiferspeicher-Systeme)

Vor allem in den Niederlanden werden häufig Systeme mit einem Aquiferspeicher, sogenannte WKO-Systeme, eingesetzt. Hierbei werden Grundwasser-Leiter in unterschiedlichen Bodenschichten zum Speichern von Wärme und Kälte verwendet. Im Winter wird aus der warmen Speicherschicht Grundwasser an die Oberfläche gepumpt, dort wird diesem dann mit einer Wärmepumpe thermische Energie entzogen, welche anschließend über ein Mittel- oder Niedertemperatur-Wärmenetz für die Bereitstellung von Raumwärme verwendet wird. Das abgekühlte Grundwasser wird daraufhin in die kältespeichernde Schicht geleitet. Im Sommer wird das kalte Wasser direkt oder auch mit Hilfe von Wärmepumpen zur Kühlung genutzt. Zudem wird durch das Kühlen die warme Speicherschicht wieder regeneriert. Um weitere Wärme in der warmen Schicht zu speichern, wird der Aquiferspeicher mit verschiedenen Wärmequellen kombiniert. Hier kommen z. B. Solarthermie-Anlagen zum Einsatz, ebenso wie Wärme aus Oberflächengewässern oder Außenluft, welche über entsprechende Wärmepumpen gewonnen wird. Wehre und Pumpstationen unterstützen zudem die Gewinnung der Wärme aus Oberflächengewässern als Infrastruktur. Anstelle der natürlichen Grundwasser-Leiter kann zur Speicherung auch ein großer saisonaler und unterirdischer Speicherbehälter verwendet werden. Niederländische Studien erwähnen hier überwiegend den Hersteller Ecovat.

Systeme mit zentralen (Groß-)Wärmepumpen ohne Saisonalspeicher

Neben einem Saisonal-Speicher, welcher ganzjährig als Haupt-Wärmequelle dient, kommen auch andere Wärmequellen zum Einsatz, die die entsprechende Wärme ganzjährig bereitstellen können. Dies können industrielle Prozesse sein, die eine ausreichend konstante Restwärme mit Temperaturen von 40 bis 60 °C liefern. Auch häufig in den niederländischen Studien erwähnt, jedoch meist im Zusammenhang mit niedrigeren Temperaturen, sind Abwasser-Wärmetauscher, die in den Abwasserkanälen von Städten und Gemeinden eingesetzt werden und dem Abwasser Wärme entziehen. Diese wird dann mit großen Wärmepumpen auf das gewünschte Temperaturniveau gehoben. Auch die Wärme aus Abwässern, die in den Kläranlagen vor oder nach der Reinigung zur Verfügung stehen, kann mit Wärmepumpen nutzbar gemacht werden. Eine weitere Wärmequelle für Mittel- oder Niedertemperaturnetze sind Erdwärmesonden-

Felder oder tiefere Geothermie-Bohrungen, die wiederum mit größeren Wärmepumpen auf Netztemperatur gebracht werden.

Bei diesen Lösungen kommen häufig auch zentrale Pufferspeicher zum Einsatz. Zudem werden häufig Spitzenlast- oder Reservekessel eingeplant. Diese können als Biogas- oder Biomasse-Kessel ausgeführt sein oder als große Luft-Wasser-Wärmepumpen. Zudem ist eine Kombination mit PV-Anlagen stets sinnvoll, um den Strombedarf der Wärmepumpen so weit wie möglich decken zu können.

Die Warmwasserbereitung erfolgt bei Nieder- und Mitteltemperatur-Netzen meist dezentral über elektrische Nachheizer oder über separate Warmwasser-Netze mit höheren Temperaturen. Versorgt werden mit diesen Netzen häufig bestehende Wohngebäude mit gewissen Dämmstandards sowie z. T. Neubauten und Nichtwohngebäude.

4.1.1.3 Kalte Wärmenetze/Quellennetze

Kalte Wärmenetze, in den Niederlanden auch oft Quellennetze genannt, sind im Gegensatz zu den zuvor genannten Netzen nicht gedämmt und liegen im Temperaturbereich von acht bis 20 °C. Oft wird hier 12 °C als Vorlauftemperatur sowie eine Temperaturspreizung von vier Kelvin angenommen. Sie nutzen oft die gleichen Wärmequellen wie die Niedertemperaturnetze. Der Unterschied ist hier, dass die Gebäude alle eigene, dezentrale Wärmepumpen haben, deren Quelle die Wärme des kalten Netzes ist. So kommen bei kalten Netzen ebenso Erdwärmesonden- oder Erdwärmekollektor-Felder, häufig Riothermie sowie auch Wärme aus Oberflächengewässern oder auch Solarthermie zum Einsatz. Die Kombination mit weiteren dezentralen PV-Anlagen oder Solarthermie-Anlagen ist gut möglich. Darüber hinaus können WKO-Systeme eingebunden werden. Zudem können die Leitungen selbst Wärme aus dem umgebenden Boden aufnehmen. Die dezentralen Wärmepumpen stellen dabei Raumwärme und Warmwasser bereit und sind meistens mit einem elektrischen Nachheizer als Reserve-Lösung ausgestattet.

4.1.2 **Dezentrale Systeme**

Dezentrale Systeme ohne Netz bestehen bei Neubauten von Wohnungen häufig aus Wärmepumpen-Systemen in Kombination mit PV-Modulen, wobei die Wärme hier zumeist über die Umgebungsluft oder Erdwärmesonden gewonnen wird. Zudem werden Holzpellet-Kessel eingesetzt.

In der Industrie können Reststoffe aus den eigenen Produktionsprozessen zur nachhaltigen Energieversorgung eingesetzt werden, wie z. B. Pflanzenöl aus der Altfettaufbereitung oder -verwertung in einem Pflanzenöl-BHKW oder Holzreste aus holzverarbeitenden Unternehmen in entsprechenden Biomasse-Kesseln. Auch Holzhackschnitzel-Kessel, die für einzelne Wohngebäude meist zu groß sind, können von Großverbrauchern eingesetzt werden.

Eine weitere Lösungsmöglichkeit besteht im Einsatz von photovoltaisch-thermischen Solarkollektoren zusammen mit einem Pufferspeicher und einer Wärmepumpe, welche die nötige Heizungstemperatur bereitstellt und über den Strom der PV-Module versorgt wird.

4.2 Ansatz zum Entwurf einer nachhaltigen Wärmeversorgung

Anhand der zuvor dargestellten Systeme und Einzelkomponenten sowie deren Kombinationsmöglichkeiten können standardisierte Wärmeversorgungssysteme entworfen werden. Als Ansatz dient der morphologische Kasten, welcher in Tab. 4-1 dargestellt ist.

Tab. 4-1: Morphologischer Kasten zur übersichtlichen Darstellung verschiedener Technologie-Kombinationen bei nachhaltigen Wärmeversorgungssystemen

Komponenten	Optionen				
Hauptkomponente 1	Biomasse / Biogas	Solar	Abwärme-Übertrager	Wärmepumpen / Power-to-Heat	Umgebungswärme-Übertrager
Hauptkomponente 2	Biomasse / Biogas	Solar	Abwärme-Übertrager	Wärmepumpen / Power-to-Heat	Umgebungswärme-Übertrager
Spitzenlast-Versorgung / Unterstützung	Biomasse / Biogas	Solar	Abwärme-Übertrager	Wärmepumpen / Power-to-Heat	Umgebungswärme-Übertrager
Speichertechnologie	Pufferspeicher	Erdbecken-Speicher	Ecovat	WKO	PCM-Speicher
Netz	HT-Netz (70 - 100 °C)	MT-Netz (45 - 65 °C)	NT-Netz (30 - 45 °C)	kaltes Netz (8 - 20 °C)	kein Netz (dezentrale Einzelversorgung)

WKO: niederländisch *Warmte Koude Opslag* (Wärme-Kälte-Speicherung mit Aquiferspeicher)
 PCM-Speicher: Phase Change Material-Speicher (Phasenwechsel-Speicher)
 HT-Netz: Hochtemperatur-Netz; MT-Netz: Mitteltemperatur-Netz; NT-Netz: Niedertemperatur-Netz

Darüber hinaus können die unterschiedlichen nachhaltigen Wärmeversorgungs-, -speicher- und -verteilungstechnologien sowie deren Kombination übersichtlich dargestellt werden. Die ersten drei Zeilen enthalten dabei jeweils die gleichen Hauptkomponenten bzw. Komponenten für die Spitzenlast-Versorgung oder Unterstützung, da meist mehrere Versorgungstechnologien miteinander kombiniert werden. Zudem sind dabei nur die Oberkategorien abgebildet, um den morphologischen Kasten kompakt und übersichtlich zu halten. Die einzelnen Technologien und Wärmequellen zu den Oberkategorien finden sich in Abb. 4-1. Damit geeignete Kombinationen für den jeweiligen Anwendungsfall ausgewählt werden können, müssen die jeweiligen Eingangs- und Bewertungsparameter beachtet werden. Anhand der Bewertungs- und Vergleichsparameter kann dann eine Priorisierung der Wärmeversorgungslösungen vorgenommen werden. Der morphologische Kasten dient daher als Visualisierung der verschiedenen Möglichkeiten und als qualitative Entscheidungshilfe.

Als Beispiel ist in Abb. 4-2 das Wärmeversorgungssystem der Machbarkeitsstudie Greven dargestellt, welches eine Solarthermie-Freiflächenanlage mit einem saisonalen Erdbecken-Wärmespeicher sowie die Wärme eines Biogas-BHKWs einer nahegelegenen Biogasanlage nutzt. Diese Wärme wird in ein klassisches (Hochtemperatur-)Wärmenetz mit Pufferspeicher eingespeist, um damit ein Wohngebiet mit nachhaltiger Wärme zu versorgen.

Bei der Darstellung im morphologischen Kasten wurde dabei immer der Oberbegriff einer Wärmeversorgungs-Technologie durch die Bezeichnung der eingesetzten Technologie ersetzt, um die dargestellte Wärmeversorgungslösung zu konkretisieren.

Wie dies für mehrere unterschiedliche Lösungen in einem morphologischen Kasten aussehen kann, zeigt Anh. 12 am Beispiel der sechs Versorgungsalternativen aus der Machbarkeitsstudie Rheine_1.

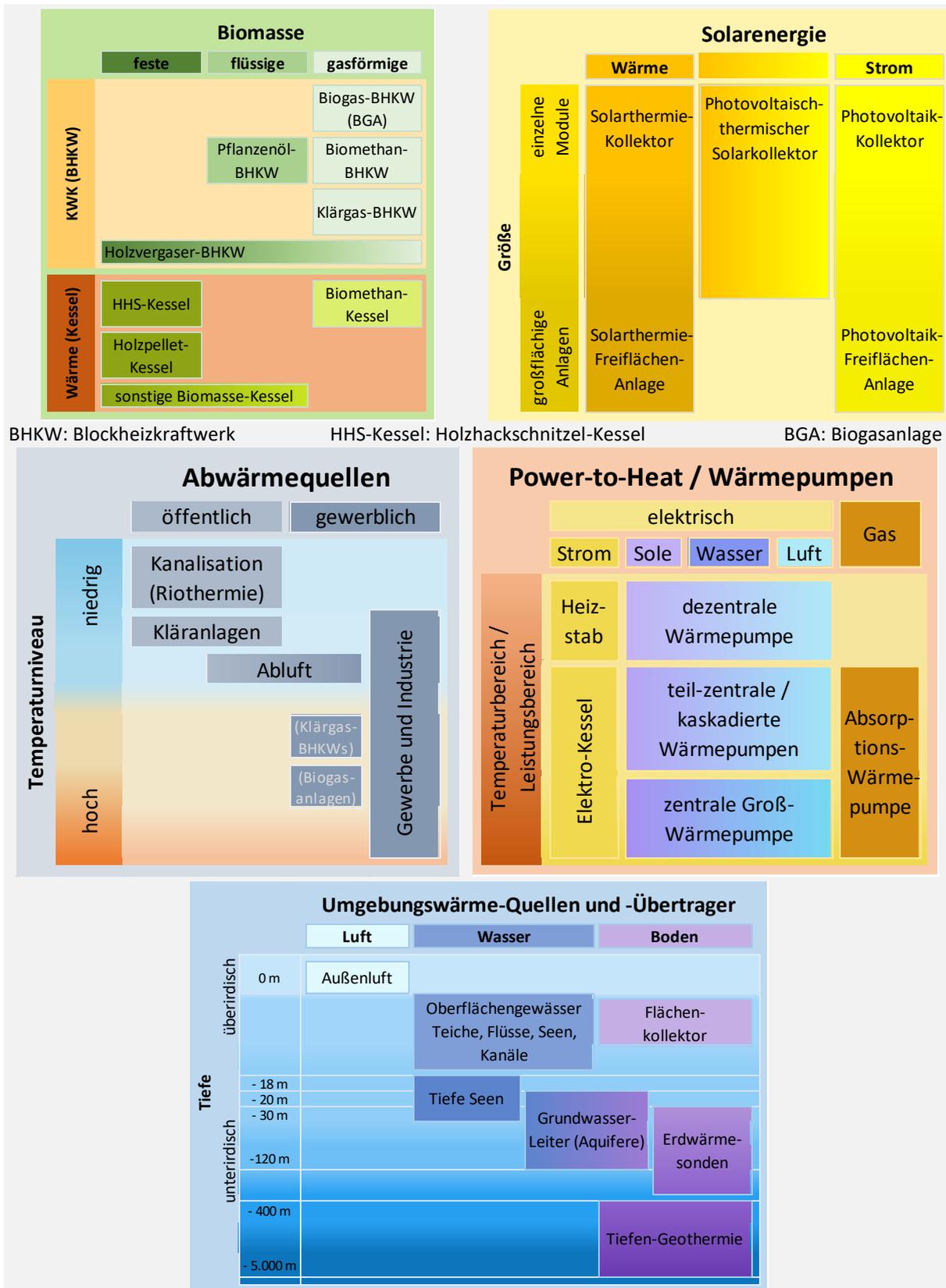


Abb. 4-1: Untergliederung der fünf Hauptkomponenten-Kategorien des morphologischen Kastens auf die einzelnen Technologien mit weiterer Kategorisierung

Komponenten	Optionen				
Hauptkomponente 1	Biomasse / Biogas	Solarthermie-Freiflächen-Anlage	Abwärme-Übertrager	Wärmepumpen / Power-to-Heat	Umgebungswärme-Übertrager
Hauptkomponente 2	Biogas-BHKW (BGA)	Solar	Abwärme-Übertrager	Wärmepumpen / Power-to-Heat	Umgebungswärme-Übertrager
Spitzenlast-Versorgung / Unterstützung	Biomasse / Biogas	Solar	Abwärme-Übertrager	Wärmepumpen / Power-to-Heat	Umgebungswärme-Übertrager
Speichertechnologie	Pufferspeicher	saisonalen Erdbecken-Speicher	Ecovat	WKO	PCM-Speicher
Netz	HT-Netz (70 - 100 °C)	MT-Netz (45 - 65 °C)	NT-Netz (30 - 45 °C)	kaltes Netz (8 - 20 °C)	kein Netz (dezentrale Einzelversorgung)

Biogas-BHKW: biogasbetriebenes Blockheizkraftwerk
 BGA: Biogasanlage
 WKO: niederländisch *Warmte Koude Opslag* (Wärme-Kälte-Speicherung mit Aquiferspeicher)
 PCM-Speicher: Phase Change Material-Speicher (Phasenwechsel-Speicher)
 HT-Netz: Hochtemperatur-Netz
 MT-Netz: Mitteltemperatur-Netz
 NT-Netz: Niedertemperatur-Netz

Abb. 4-2: Darstellung des Wärmeversorgungssystems der Machbarkeitsstudie Greven_1 im morphologischen Kasten

Mit der Kategorisierung der nachhaltigen Wärmeversorgungssysteme und dem Entwurf einer Auswahlmatrix sind die Grundlagen für einen standardisierten Entwurf und Vergleich von nachhaltigen Wärmeversorgungssystemen geschaffen. In einem nächsten Schritt müssen die vielen Parameter und Faktoren quantifiziert werden.

5 DISKUSSION DER ERGEBNISSE UND AUSBLICK

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit basieren im Wesentlichen auf der Auswertung der Machbarkeitsstudien des WiEfm-Projekts in Bezug auf nachhaltige Wärmeversorgungssysteme. Diese wurden beschrieben und zu verschiedenen repräsentativen Systemen zusammengefasst.

Zudem wurde nach einer Möglichkeit gesucht, nachhaltige Wärmeversorgungssysteme miteinander zu vergleichen und anhand eines solchen Vergleichs und einer Vorauslegung eine Empfehlung zu treffen.

5.1 Arten und Merkmale nachhaltiger Wärmeversorgungssysteme

Aus den Analysen der vorliegenden Arbeit gehen verschiedene nachhaltige Wärmeversorgungssysteme hervor, welche zum Großteil kollektive und netzgebundene Lösungen sind, aber auch dezentrale Systeme beinhalten.

Folgende nachhaltige Wärmeversorgungssysteme konnten identifiziert werden:

- Systeme mit Biomasse- oder Biogas-Wärmeerzeugern,
- Systeme mit zentraler Solarthermie-Anlage und Langzeit-Speicherung,
- Systeme mit Abwärme,
- Systeme mit Wärmepumpen,
- Systeme mit Aquifer-Speichern (WKO-Systeme) sowie
- Systeme mit einem kalten Wärmenetz.

Im Folgenden werden diese Systeme diskutiert.

5.1.1 Systeme mit Biomasse- oder Biogas-Wärmeerzeugern

Die vorangegangene Untersuchung der Systeme zeigt, dass Biomasse-Systeme bei den nachhaltigen Wärmeversorgungslösungen in der EUREGIO häufig eingesetzt oder geplant werden. Dieses Ergebnis stimmt mit den Aussagen aus Abschnitt 2.3 überein, wonach über 80 % der Wärme aus erneuerbaren Quellen in Deutschland und in den Niederlanden aus Biomasse stammen. Systeme, die Biomasse oder Biogas verbrennen, kommen dabei zumeist dann vor, wenn höhere Temperaturen von 70 bis 90 °C für Heizung und Warmwasser bereitgestellt werden sollen, wie dies in vielen bestehenden Systemen, die mit Heizöl oder Erdgas betrieben

werden, der Fall ist. Diese Biomasse-Systeme erfordern daher meist nur geringe Anpassungen der zu versorgenden Immobilien und eignen sich deshalb besonders für viele bestehende Gebiete, bei denen eine energetische Sanierung nicht vorgesehen ist. Biomasse-Wärmeerzeuger gibt es in einem weiten Leistungsbereich, weshalb diese passend auf die jeweiligen Ansprüche ausgelegt werden können und somit ist sowohl eine Einzelversorgung als auch eine kollektive Versorgung mit diesen realisierbar.

Biomasse-Kessel und Biogas- sowie Biomethan-Kessel und -BHKWs stellen das gleiche hohe Temperaturniveau bereit, wie konventionelle Öl- und Gas-Kessel und sind beim Einsatz von Biogas auch ebenso flexibel. Daher ist der häufige Einsatz dieser Technologie nachvollziehbar. Jedoch ist für ein nachhaltiges Energiesystem auf Basis von Biomasse entscheidend, dass auch der Rohstoff Holz nur dann wirklich nachhaltig ist, wenn nicht mehr davon eingesetzt wird, als im gleichen Zeitraum nachwächst und das Holz aus regionalen Quellen stammt. Weite Transportwege und die Nutzung von Holz aus kritischen Quellen würden hier dem Nachhaltigkeitsgedanken widersprechen. Beim Einsatz von fester Biomasse, wie Pellets oder Holzhackschnitzeln, sind daher vorrangig regionale Quellen zu nutzen, z. B. Holz aus Kurzumtriebsplantagen oder ohnehin anfallender städtischer Grünschnitt und auch Laubbriketts, wie in einer Machbarkeitsstudie vorgeschlagen. Eine Kombination mit Solarthermie verringert darüber hinaus den Einsatz des Brennstoffs.

Biogas-Systeme setzen in der Regel Biogasanlagen in der Umgebung voraus. Wärme aus Biogasanlagen kann eine zuverlässige Quelle darstellen, da diese bei vielen Biogasanlagen als Überschuss bei der Stromerzeugung in BHKWs anfällt und die Biogasanlagen über das ganze Jahr konstant betrieben werden können. Im Jahr 2018 sind in Deutschland 12.000 Biogasanlagen in Betrieb, erstmals jedoch weniger als im Vorjahr (AEE 2019). Mit der auslaufenden EEG-Vergütung für den Strom aus Biogasanlagen besteht das Risiko, dass die Zahl der Biogasanlagen abnimmt. Mit einer Änderung des Geschäftsmodells und einem verstärkten Fokus auf den Wärmeverkauf bestehen hier jedoch gute Chancen, dass viele Biogasanlagen weiter betrieben werden und nachhaltige Wärme zur Verfügung stellen können.

Zudem kann das Biogas auf Erdgas-Qualität aufbereitet und in das Erdgasnetz eingespeist werden, was eine Vermarktung unabhängig vom Standort ermöglicht. Das Biomethan wird dann bilanziell aus dem Erdgasnetz entnommen und in einem konventionellen Erdgas-Kessel oder -BHKW eingesetzt und kann überall dort, wo ein Erdgas-Anschluss besteht, genutzt werden. Ein erhöhter Biomethan-Anteil im Erdgas-Netz kann fossiles Erdgas verdrängen und

auch die Importabhängigkeit verringern. Zudem ist Biomethan dadurch sehr flexibel anwendbar und kann auch optimal in Kesseln zur Spitzenlastversorgung eingesetzt werden.

5.1.2 Systeme mit zentraler Solarthermie-Anlage und Langzeit-Speicherung

Großflächige Solarthermie-Anlagen mit Langzeit-Wärmespeichern können einen maßgeblichen Teil der Raumwärme- und Warmwasser-Versorgung von Siedlungen über ein Wärmenetz bereitstellen. Da kein Brennstoff nötig ist, entfallen die Beschaffungskosten für diesen. Die Investitionen und der anfängliche Aufwand sind dagegen höher als bei anderen regenerativen Systemen, zudem wird viel Platz benötigt. Eine gute Planung und Auslegung kann bei Neubausprojekten jedoch eine gute Integration in das Baugebiet schaffen. Ebenso können auch in Bestandsgebieten Dachflächen genutzt werden, um Solarthermie-Kollektoren zu platzieren, welche dann in ein gemeinsames Speicher- und Versorgungssystem einspeisen. Für einen möglichst hohen solaren Deckungsgrad sind Langzeit-Wärmespeicher entscheidend, da Wärmeangebot und Wärmenachfrage bei der Solarthermie über den Zeitraum eines Jahres gegenläufig sind.

Dagegen decken sich das solare Wärmeangebot und der Kühlbedarf. Dies kann durch den Einsatz einer Absorptions-Wärmepumpe (bzw. -Kältemaschine) in Verbindung mit Solarthermie genutzt werden.

Zur Unterstützung von Warmwasserbereitung und Heizung eignet sich die Solarthermie auch in kleinem Maßstab bei dezentralen Systemen sehr gut und hilft dabei andere Brennstoffe oder Strom einzusparen. Der Einsatz von Solarthermie-Anlagen sollte aus Sicht der Nachhaltigkeit immer mitberücksichtigt werden.

5.1.3 Systeme mit Abwärme

Systeme, die Abwärme direkt über Wärmetauscher und ohne den Einsatz einer Wärmepumpe nutzen können, setzen eine zuverlässige Abwärmequelle voraus. Diese muss die benötigte Wärmemenge und das benötigte Temperaturniveau nahezu kontinuierlich zur Verfügung stellen. Kurze Pausenzeiten können dabei über einen Pufferspeicher überbrückt werden. Solche Abwärmequellen sind zumeist Industrieprozesse. Die Nutzung dieser Wärme, welche durch Industrieprozesse ohnehin anfällt, trägt in dem Umfang zu einer nachhaltigen Wärmeversorgung bei, in dem dadurch andere fossile Wärmeversorgungs-Anlagen wegfallen können, wodurch eine doppelte Wärmeerzeugung verhindert wird. Wichtig für die Umsetzung ist eine räumliche Nähe zu den Wärmeabnehmern. Der Effekt der Nachhaltigkeit ist dabei noch höher,

wenn die Prozesse, bei denen die Abwärme anfällt, ihrerseits ebenfalls mit erneuerbaren Energien betrieben werden. Im Bereich der Abwärmenutzung gibt es viel Potenzial, welches jedoch oft nicht bekannt ist und umfangreiche Untersuchungen erfordert. Das Projekt ReUseHeat beschäftigt sich mit dieser Thematik.

5.1.4 Systeme mit Wärmepumpen

Wärmepumpen-Systeme können sehr vielseitig ausgestaltet und mit vielen Niedertemperatur-Wärmequellen kombiniert werden. Dadurch kann z. B. Wärme aus Oberflächengewässern, der Umgebungsluft, dem Boden, dem Grundwasser und Abwasser nutzbar gemacht werden. Für eine hundertprozentige Nachhaltigkeit ist entscheidend, dass der Strom zum Betrieb der Wärmepumpen ebenfalls aus erneuerbaren Energien stammt. Im Optimalfall wird der Strom dafür von PV-Anlagen oder Windkraftanlagen vor Ort erzeugt. Durch eine Wärme- oder Strom-Speicherung kann eine kontinuierliche Versorgung mit erneuerbarer Energie realisiert werden, welche über eine bilanzielle Versorgung mit erneuerbaren Energie im Jahresverlauf hinausgeht. Der Vorteil der Nutzung von Wärmespeichern anstelle von Stromspeichern bei Wärmepumpen-Systemen besteht in den geringeren Speicher-Kosten und der besseren Speicherbarkeit auf der Wärmeseite. Werden die Wärmepumpen zur Beladung der Speicher immer dann betrieben, wenn der Strompreis durch ein hohes Stromangebot niedrig ist, verbessert das die finanzielle Situation. Bei Neubauprojekten sollte daher die Errichtung von PV-Anlagen auf Dachflächen oder Freiflächen sowie auch die Einbindung und Planung von Windkraftanlagen mitberücksichtigt werden. Die Langzeit-Wärmespeicher gewährleisten die ganzjährige Verfügbarkeit von Wärme und werden meist im Sommer aufgeladen, wenn viel Umgebungswärme genutzt werden kann und die Wärmenachfrage niedrig ist.

Des Weiteren sind auch kollektive Wärmepumpen-Systeme ohne Langzeit-Speicher möglich, welche im besten Fall mit lokalem PV-Strom zu betreiben sind. Hier ist das Vorhandensein von Wärmequellen mit überwiegend konstantem Wärmeangebot nötig. Dies können Prozesse aus Industrie- und Gewerbebetrieben sein oder Abwärme aus der Kanalisation und Kläranlagen. Auch geothermische Flächenkollektoren und Sondenfelder oder die Umgebungsluft können konstant Wärme bereitstellen.

Wärmepumpen, die mit Außenluft, einem Flächenkollektor oder Erdwärmesonden arbeiten, werden ebenfalls häufig als dezentrale Einzelversorgung genutzt.

5.1.5 Systeme mit einem kalten Wärmenetz

Kalte Wärmenetze erfordern ebenfalls den Einsatz von Wärmepumpen. In dem kalten Netz haben diese den Vorteil gegenüber dezentralen Systemen, dass die Wärmequelle nicht direkt auf dem Grundstück liegen muss. So können z. B. bei der Nutzung von Geothermie Erdwärmesonden-Felder angelegt werden, deren thermische Energie über das kalte Netz verteilt wird. Als direkte Wärmequelle der dezentralen Wärmepumpen dient somit keine einzelne Erdsonden-Bohrungen auf jedem Grundstück, sondern das kalte Netz, welches wiederum von zentraler Stelle thermische Energie bezieht. Auch die Einbindung von Speichern funktioniert auf diese Weise besser, da diese ein größeres Volumen im Verhältnis zur Oberfläche aufweisen und somit effektiver und mit weniger Wärmeverlusten arbeiten können. Durch den Effekt der Gleichzeitigkeit kann zudem die benötigte Systemleistung kleiner ausfallen, als dies in der Summe der Einzelsysteme der Fall wäre.

5.1.6 Systeme mit Aquifer-Speichern (WKO-Systeme)

Aquifer-Speicher-Systeme bzw. WKO-Systeme können auch als Hauptversorger dienen und mit unterschiedlichen Wärmequellen aus der Umgebung oder Abwärme kombiniert und regeneriert werden. Wärmepumpen sind dabei fast immer Bestandteil des Systems. Das Temperaturniveau bewegt sich daher im Mittel- bis Niedertemperaturbereich. Zudem wird mit WKO-Systemen gekühlt. Diese Systeme sind maßgeblich von der Möglichkeit abhängig den Untergrund und die darin enthaltenen Grundwasserleiter zu nutzen. Wichtig ist zudem ein ausgeglichenes Verhältnis von Wärmenachfrage und Kältenachfrage, um die Speicherschichten regelmäßig zu regenerieren, da ansonsten das Risiko besteht, dass der Boden zu sehr auskühlt und die Wärmebereitstellung nicht mehr sichergestellt ist. Diese Regeneration wird daher oft mit Wärmequellen wie z. B. der Umgebungsluft, Oberflächengewässern, Abwärme oder Solarthermie sichergestellt. Da bei WKO-Systemen aktiv in natürliche Grundwasserschichten eingegriffen wird, ist eine sorgfältige Prüfung der Umweltauswirkungen in jedem Fall durchzuführen.

5.1.7 Sanierung

Der Einsatz der zuvor genannten Systeme muss zudem im Zusammenhang mit dem Thema Sanierung des Gebäudebestands betrachtet werden. Aus Kapitel 3.1.2 geht hervor, dass die bis 1995 errichtete Gebäude ein hohes Einsparpotenzial beim Energieverbrauch aufweisen. In diesen Gebäuden wurden in Deutschland überwiegend Heizöl- oder Erdgas-Zentralheizungen

und in den Niederlanden überwiegend Erdgas-Kessel eingesetzt. Eine Sanierung ermöglicht hier durch die energetischen Einsparungen den Einsatz von Mittel- bis Niedertemperatur-Systemen mit unterschiedlichen Wärmequellen. Ist eine Sanierung vorerst nicht vorgesehen oder nicht möglich (wegen Denkmalschutz beispielsweise) können hier Lösungen mit Biomasse oder Biogas sowie Solarthermie eingesetzt werden, um erneuerbare Energiequellen auf höherem Temperaturniveau zu nutzen.

5.1.8 Ausbau der Wärmenetz-Infrastruktur

Der Ausbau der Wärmenetz-Infrastruktur, wie in der 40/40-Strategie in Abschnitt 3.5.2.2 beschrieben, schafft weitere Potentiale zum Einsatz erneuerbarer Energien. Deren Anteil kann schrittweise erhöht werden, wenn die Wärmenetz-Infrastruktur erst einmal besteht und zu Beginn gegebenenfalls mit den vorhandenen fossilen Erzeugern teilversorgt wird. So ist einerseits die Versorgungssicherheit gewährleistet und andererseits die Voraussetzung für den Ausbau erneuerbarer Wärmequellen geschaffen.

Die in Kapitel 2.1.2 erarbeitete Übersicht zur Siedlungsstruktur zeigt die Verteilung der Einwohner in der EUREGIO auf Städte und Gemeinden mit unterschiedlichen Größen (Einwohnerzahlen). Im Vergleich zur deutschlandweiten Betrachtung des AGFW hat die EUREGIO eine etwas andere Verteilung der Bevölkerung auf die unterschiedlichen Gemeindekategorien. Laut AGFW (2018, S. 8) leben in ganz Deutschland knapp 28 % der Bevölkerung in Großstädten mit mehr als 100.000 Einwohnern, 35 % in Mittelstädten mit 20.000 bis 100.000 Einwohnern und 13 % in Kleinstädten mit 5.000 bis 20.000 Einwohnern. In der EUREGIO hingegen leben fast 57 % der Einwohner in Städten und Gemeinden mit einer Größe von 20.000 bis 100.000 Einwohnern und nur 19 % in Städten mit mehr als 100.000 Einwohnern. Fast ein Viertel der Bevölkerung lebt in Gemeinden mit 5.000 bis 20.000 Einwohnern. Dies liegt einerseits an der eher ländlich geprägten Siedlungsstruktur im deutsch-niederländischen Grenzgebiet der EUREGIO und andererseits an der Verwaltungsstruktur niederländischer Gemeinden.

Da mehr als die Hälfte der Einwohner in der mittleren Gemeindekategorie lebt, kann daraus geschlossen werden, dass in der EUREGIO ein stärkerer Fokus auf diese Städte und Gemeinden gelegt werden muss. Daher sollte das Ziel für den Anteil der Fernwärme an der Wärmeversorgung hier regional höher als die vom AGFW vorgeschlagenen 35 % liegen.

5.2 Vergleich und Empfehlung nachhaltiger Wärmeversorgungssysteme

Viele der Wärmeversorgungs-Technologien können miteinander kombiniert werden oder bestehen selbst aus verschiedenen, unterschiedlich kombinierbaren Elementen. Deshalb wurde eine Möglichkeit gesucht, um diese verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten übersichtlich darzustellen. Das Resultat ist eine Darstellung mit Hilfe eines morphologischen Kastens, welcher hier aus einem Gitter von fünf mal fünf Feldern besteht und die verschiedenen Komponenten eines Wärmeversorgungssystems darstellt. Dies sind die Wärmequellen und Wärmeerzeuger, die Speichertechnologien und die Art der Wärmeverteilung.

Die oberen drei Reihen des morphologischen Kastens sind gleich und enthalten die verschiedenen Oberkategorien von Wärmeerzeugern. Jede Zelle der oberen Reihen lässt sich daher auch weiter in die einzelnen Wärmeversorgungs-technologien oder -quellen der jeweiligen Oberkategorie unterteilen. Tab. 4-1 und Abb. 4-1 zeigen den morphologischen Kasten und die Untergliederung der oberen Reihen. Dieser Aufbau ist nicht ideal, da die Unterteilung der oberen Reihen die Darstellung anschließend wieder unübersichtlicher oder komplexer macht, verhindert aber in einem ersten Schritt, dass der morphologische Kasten deutlich mehr als fünf Spalten hat. Der Kasten kann bei einem Vergleich von Systemen unter anderem zeigen, aus wie vielen zentralen Komponenten die jeweiligen Systeme bestehen.

Die Darstellung der Bewertungskriterien sowie der nötigen Eingangsparameter zur Berechnung und zum anschließenden Vergleich und der Auswahl einer geeigneten Wärmeversorgungs-lösung erfolgte im Rahmen dieser Arbeit nur qualitativ und in kurzer Form, die einen ersten Eindruck vermittelt. Hier müssen in nachfolgenden Arbeiten für jedes nachhaltige Wärmeversorgungssystem die Eingangsparameter für eine Berechnung und Auslegung im Detail ermittelt, quantifiziert und bewertet werden.

Zudem existieren bereits interaktive Karten-Tools zu vielen verschiedenen Wärmequellen, sogenannte geographische Informationssysteme (GIS), welche eine große Fülle an Informationen bereitstellen und grafisch aufbereiten. Zum Teil sind Informationen zu Wärmenachfrage und Wärmeangebot bereits verknüpft. In der Hot-Spot-Karte des WiEfm-Projekts liegt der Fokus auf einer sehr übersichtlichen und eindeutigen Darstellung bei gleichzeitig genauer Datengrundlage. Diese Form der reduzierten Informationsfülle trotz umfangreicher Datengrundlage ist auch für die Darstellung der Potenziale für nachhaltige Wärmeversorgungs-Lösungen anzustreben.

5.3 Ausblick

Der nächste Schritt ist nun, eine Software zu entwickeln, welche möglichst viele der benötigten Eingangsparameter zum Entwurf der verschiedenen Wärmeversorgungssysteme automatisch ermitteln und bereitstellen kann. Das wäre mit Hilfe von GIS-Daten und anhand eines Kartentools denkbar, welches unterschiedliche Layer, wie den Wärmebedarf, die Temperaturverläufe der Außenluft, die solare Einstrahlung, die Möglichkeiten und Einschränkungen für Geothermie und WKO und weitere Aspekte, mit dem Standort verknüpft und auch weitere potenzielle Wärmequellen in einem definierten Umkreis des gewählten Standortes miteinbezieht, wie Standorte von Biogasanlagen, Industrie, nutzbaren Oberflächengewässern und Ähnlichem. Diese Daten sollen so verknüpft und verarbeitet werden, dass alle potenziell denkbaren Wärmeversorgungssysteme für den gewählten Standort überschlägig berechnet und dann verglichen werden können, sodass der Nutzer eine übersichtliche sowie eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse abrufen kann. Dazu müssen die Ausgabeparameter priorisiert und gewichtet werden. Im Optimalfall kann so eine Karte geschaffen werden, welche Wärmeverrangzonen nach dänischem Vorbild (wie in Abschnitt 3.5.1 beschrieben) enthält und die jeweils günstigste und nachhaltigste Wärmeversorgungsalternative anzeigt.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Das Projekt WiEfm (Wärme in der EUREGIO – fokussieren und modernisieren) hat verschiedene Anstöße gegeben, um nachhaltige Wärmeversorgungssysteme in den Fokus zu rücken und deren Entwicklung voranzubringen. Das Nachfolgeprojekt Task Force Wärmewende will daran anknüpfen und daran arbeiten das politische und gesellschaftliche Interesse an einer nachhaltig gestalteten Wärmeversorgung in der deutsch-niederländischen Europa-Region EUREGIO weiter zu steigern, Projekte zu initiieren und in die Umsetzung zu bringen und damit ein Vorbild für viele weitere Regionen in Europa und der Welt sein. Die erste Europa-Region und ihre 3,35 Millionen Einwohner können so gemeinsam an der Erreichung der regionalen, nationalen und europäischen Klimaschutz-Ziele arbeiten und mit der Wärmeversorgung einen Sektor mit wesentlichem Beitrag an den Treibhausgas-Emissionen umgestalten, indem die Energieeffizienz und der Einsatz erneuerbarer Energien gesteigert werden. Denn mit etwa der Hälfte des Endenergieverbrauchs hat der noch überwiegend fossil arbeitende Wärmesektor einen maßgeblichen Anteil an den Treibhausgas-Emissionen. Die Umstellung auf eine nachhaltige und erneuerbare Wärmeversorgung ist wichtig für die Begrenzung der Erderwärmung auf unter 1,5 °C. Wenn diese Umstellung in den erdgas-dominierten Niederlanden und dem ebenfalls stark von Gas, Öl und Kohle geprägten Deutschland erfolgreich gelingt, hat dies einen starken Vorbild-Charakter. In Deutschland sollen die erneuerbaren Energien in der Wärmebereitstellung von 14 % im Jahr 2020 auf 27 % im Jahr 2030 ansteigen. Dabei machen Raumwärme und Warmwasserbereitung zusammen gut ein Drittel am Endenergieverbrauch Deutschlands aus. Gebäudetypologie und -alter sowie der Sanierungsstand der Gebäude sind dabei wichtige Faktoren für deren Energieverbrauch. In den Niederlanden sind viele Gebäude ohne nennenswerte Dämmmaßnahmen gebaut worden und auch in Deutschland stammen etwa zwei Drittel der Gebäude aus der Zeit vor der ersten Wärmeschutzverordnung von 1977, welche erstmals gesetzliche Dämmstandards festlegte. Diese Gebäude machen gut drei Viertel des flächenbezogenen Energieverbrauchs aus. Eine Sanierung und gleichzeitige Umstellung des Wärmeversorgungssystems birgt daher ein großes Potenzial zur Verringerung der Treibhausgas-Emissionen.

Die vorliegende Arbeit stellt sich dazu die Frage, welche nachhaltigen Wärmeversorgungssysteme es gibt und was diese charakterisiert. Darüber hinaus wird die Frage aufgeworfen, welche Faktoren relevant sind, um ein nachhaltiges Wärmeversorgungssystem umzusetzen und welche Eingabeparameter für eine Empfehlung und einen Vergleich benötigt werden. Dazu werden die Machbarkeitsstudien des WiEfm-Projekts ausgewertet.

Alte Öl-, Gas- und Stromheizungen in Deutschland und den Niederlanden können demnach gut durch biomasse-befeuerte Anlagen ersetzt werden. Solarthermie kann zudem einen gewissen Teil der Warmwasserbereitung übernehmen und Brennstoff einsparen. Wird dagegen auf kollektive Wärmeversorgung über ein Wärmenetz und saisonale Wärmespeicher gesetzt, kann die Solarthermie noch deutlich höhere Deckungsgrade erreichen. Die restliche Wärme kann aus Biomasse von Biogasanlagen oder aus Abwärme bereitgestellt werden. Sofern der Energieverbrauch durch geeignete Sanierungsmaßnahmen oder Neubau geringer ist, sind Wärmepumpen in Kombination mit Photovoltaik-Anlagen ein geeignetes Mittel, um viele verschiedene Wärmequellen nutzbar zu machen. Dadurch können Wärmeströme aus Abwasser, der Umgebungsluft, Seen, Flüssen und anderen Gewässern, dem Grundwasser oder dem Boden in unterschiedlichen Tiefen zur Beheizung und oft auch Kühlung von Gebäuden genutzt werden. Zudem können diese Wärmequellen ihre Wärme in einen Langzeit-Wärmespeicher oder ein Wärmenetz einspeisen und zentral – oder bei kalten Netzen auch erst direkt beim Abnehmer – auf das benötigte Temperaturniveau gehoben werden.

Die vielen verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten nachhaltiger Wärmeversorgungssysteme und -technologien erfordern eine übersichtliche Darstellung, welche mit dem in dieser Arbeit entworfenen morphologischen Kasten möglich wird. Dieser besteht aus einem Gitter von fünf mal fünf Feldern, wobei die oberen drei Reihen gleich sind und die verschiedenen Oberkategorien von Wärmeerzeugern enthalten. Jede Zelle der oberen Reihen lässt sich daher weiter in die einzelnen Wärmeversorgungstechnologien oder -quellen der jeweiligen Oberkategorie unterteilen.

Die Eignung dieser nachhaltigen Wärmeversorgungssysteme und die im jeweiligen Anwendungsfall möglichen Kombinationen hängen von verschiedenen Parametern ab, die oft auf regionale Gegebenheiten zurückzuführen sind. Die Möglichkeiten und Potenziale des Standortes miteinzubeziehen, ist demzufolge ein entscheidender Erfolgsfaktor. Dafür ist die Kombination vieler Standortdaten erforderlich, welche oft schon als interaktive Karten verfügbar sind. Der nächste Schritt wäre daher nun mit Hilfe einer zu entwickelnden Software möglichst viele Eingangsparameter für die Berechnung und den Vergleich der verschiedenen Wärmeversorgungssysteme automatisch zu ermitteln und zu verrechnen. Im Optimalfall kann so eine Karte geschaffen werden, welche Wärmezonen mit der jeweils günstigsten und nachhaltigsten Wärmeversorgungsalternative anzeigt.

7 VERZEICHNISSE

7.1 Quellenverzeichnis

AEE 2017:

Agentur für Erneuerbare Energien e.V. (AEE) (2017): Erzielte Temperaturen aus erneuerbaren Wärmequellen. Nach Temperaturniveaus in Grad Celsius (°C). Hrsg. v. Agentur für Erneuerbare Energien e.V. (AEE). www.unendlich-viel-energie.de/media/image/22191.AEE_Erzielte_Temperaturen_aus_Erneuerbaren_Waermequellen_1706_72dpi.jpg, abgerufen am 26.06.2019.

AEE 2018:

Agentur für Erneuerbare Energien e.V. (AEE) (2018): Wärme aus Erneuerbaren Energien 2017. www.unendlich-viel-energie.de/media/image/22511.AEE_Waerme_aus_Erneuerbaren_Energien_2017_mar18_72dpi.jpg, abgerufen am 08.07.2019.

AEE 2019:

Agentur für Erneuerbare Energien e.V. (AEE) (Hrsg.) (2019): Landesinfo - Deutschland (D) - Bioenergie. Anzahl und Dichte von Biogasanlagen. www.foederal-erneuerbar.de/landesinfo/kategorie/bioenergie/auswahl/189-anzahl_und_dichte_vo/bundesland/D/ersatz/0/#goto_189, abgerufen am 22.08.2019.

AGEB 2018a:

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V. (AGEB) (2018): AG_Energiebilanzen Endenergieverbrauch_D_ausw_30jul2018_ov. <https://ag-energiebilanzen.de/10-0-Auswertungstabellen.html>, abgerufen am 08.06.2019.

AGEB 2018b:

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V. (AGEB) (2018): Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2013 bis 2017. Unter Mitarbeit von Hans-Joachim Ziesing. Berlin. https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ageb_bericht_anwendungsbilanzen_2013-2017_final__2019-01-03.pdf, abgerufen am 26.06.2019.

AGFW 2014:

AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V. (AGFW) (2014): Arbeitsblatt AGFW FW 309 Teil 1. Energetische Bewertung von Fernwärme - Bestimmung der spezifischen Primärenergiefaktoren für Fernwärmeversorgungssysteme. www.agfw.de/technik-sicherheit/erzeugung-sektorkopplung-speicher/energetische-bewertung/enev-und-fernwaerme/, abgerufen am 12.08.2019.

AGFW 2018:

AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V. (AGFW) (Hrsg.) (2018): 40/40-Strategie. Unser Konzept für die Wärmewende. 2. Aufl. Unter Mitarbeit von Markus Blesl, Matthias Koziol, Maria Christin Ludwig, Harald Rapp, Bernd Tenberg, Sarah Vautz und Stefan Wolf. Frankfurt am Main.
www.agfw.de/energiekonzepte/7070-4040-strategie/, abgerufen am 20.08.2019.

Agora Energiewende u. Agora Verkehrswende 2018:

Agora Energiewende; Agora Verkehrswende (Hrsg.) (2018): Die Kosten von unterlassendem Klimaschutz für den Bundeshaushalt. Die Klimaschutzverpflichtungen Deutschlands bei Verkehr, Gebäuden und Landwirtschaft nach der EU-Effort-Sharing-Entscheidung und der EU-Climate-Action-Verordnung. Unter Mitarbeit von Matthias Deutsch, Matthias Buck, Patrick Graichen und Fritz Vorholz. Berlin. www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2018/Non-ETS/142_Nicht-ETS-Papier_WEB.pdf, abgerufen am 26.06.2019.

Arcon-Sunmark o. J.:

Arcon-Sunmark GmbH (Arcon-Sunmark) (Hrsg.) (o. J.): Die Fernwärmeversorgung in Silkeborg (DK) vertraut auf die Sonne. <http://de.arcon-sunmark.com/referenzen/fjernvarme-silkeborg-danmark>, abgerufen am 04.08.2019.

BBSR o. J.:

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (o. J.): Laufende Stadtbeobachtung - Raumabgrenzungen.
www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Raumbeobachtung/Raumabgrenzungen/deutschland/gemeinden/StadtGemeindetyp/StadtGemeindetyp_node.html.

BMU 2016:

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2016): Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. 2. Aufl. Berlin. www.bmu.de/publikation/klimaschutzplan-2050/, abgerufen am 27.04.2019.

BMU u. BMWi 2010:

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU);
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Berlin.
www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiekonzept-2010.html, abgerufen am 11.05.2019.

BMWi 2014:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2014): Sanierungsbedarf im Gebäudebestand. Ein Beitrag zur Energieeffizienzstrategie Gebäude. Berlin.
www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/sanierungsbedarf-im-gebaeudebestand.pdf, abgerufen am 20.08.2019.

BMWi 2018:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2018): Entwurf des integrierten nationalen Energie- und Klimaplan.

https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/germany_draftnecp.pdf, abgerufen am 20.08.2019.

BMWi 2019:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2019): Gesamtausgabe der Energiedaten - Datensammlung des BMWi.

www.bmwi.de/Redaktion/DE/Binaer/Energiedaten/energiedaten-gesamt.xls.xlsx?__blob=publicationFile&v=95, zuletzt aktualisiert am 22.01.2019, abgerufen am 30.06.2019.

BNetzA 2019:

Bundesnetzagentur (BNetzA) (Hrsg.) (2019): SMARD Strommarktdaten.

<https://smard.de/home/>, abgerufen am 30.07.2019.

Bode 2018:

Bode Planungsgesellschaft für Energieeffizienz m.b.H. (Bode) (2018):

Machbarkeitsstudie Nahwärmenetz - Gemeinde Senden. Schulzentrum Senden. Münster.

www.wiefm.eu/wp-content/uploads/2018/12/2018-11-08-Machbarkeitsstudie-Senden.pdf, abgerufen am 01.08.2019.

Bollin 2009:

Bollin, Elmar (Hrsg.) (2009): Automation regenerativer Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden. Komponenten, Systeme, Anlagenbeispiele. Unter Mitarbeit von Martin Becker, Ekkehard Boggasch, Mathias Fraaß, Alfred Karbach, Peter Ritzenhoff, Dieter Striebel und Elmar Bollin. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner (Praxis).

BReg 1977:

Bundesregierung Deutschland (BReg) (11.08.1977): Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden. WärmeschutzV. In: *Bundesgesetzblatt* 1977 (56), S. 1554–1564.

www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBI&jumpTo=bgbl177s1554.pdf, abgerufen am 26.07.2019.

BReg 2018:

Bundesregierung Deutschland (BReg) (2018): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie.

Aktualisierung 2018. Berlin. www.bundesregierung.de/breg-de/themen/nachhaltigkeitspolitik/die-deutsche-nachhaltigkeitsstrategie-318846, abgerufen am 11.05.2019.

Burkhardt u. a. 2015:

Burkhardt, M.; Koschack, T.; Busch, G. (2015): Biocatalytic methanation of hydrogen and carbon dioxide in an anaerobic three-phase system. In: *Bioresource technology* 178, S. 330–333. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.08.023.

BZK o. J.:

Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties (BZK) (Hrsg.) (o. J.): Bestuurlijke indeling van Nederland. <https://kennisopenbaarbestuur.nl/thema/bestuurlijke-indeling-van-nederland/>, abgerufen am 24.07.2019.

BZK 2018:

Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties (BZK) (Hrsg.) (2018): Twaalf herindelingen. www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2018/07/10/twaalf-herindelingen, abgerufen am 21.06.2019.

C.A.R.M.E.N. e. V. 2019:

Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V. (C.A.R.M.E.N. e. V.) (2019): Sophena. www.carmen-ev.de/infothek/downloads/sophena, abgerufen am 21.08.2019.

CBS 2018:

Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS) (Hrsg.) (2018): Hernieuwbare energie in Nederland 2017. www.cbs.nl/-/media/_pdf/2018/40/hernieuwbare-energie-webversie.pdf, abgerufen am 23.06.2019.

CBS 2019a:

Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS) (Hrsg.) (2019): Bevolkingsontwikkeling; regio per maand. <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/37230ned/table?fromstatweb>, abgerufen am 17.08.2019.

CBS 2019b:

Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS) (Hrsg.) (2019): Energiebalans; aanbod, omzetting en verbruik. <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/83140NED/table?ts=1555756633259>, zuletzt aktualisiert am 24.06.2019, abgerufen am 21.08.2019.

CBS 2019c:

Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS) (Hrsg.) (2019): Hernieuwbare energie; verbruik naar energiebron, techniek en toepassing. <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/83109NED/table?ts=1563981071776>, zuletzt aktualisiert am 27.06.2019, abgerufen am 24.07.2019.

CCS 2019:

Cornelissen Consulting Services B.V. (CCS) (Hrsg.) (2019): Duurzame energievoorziening door Biogashub Noord Deurningen / Lattrop-Breklenkamp. De agrarische sector als duurzame energieleverancier voor industriewarmte en/of groen gas. Unter Mitarbeit von K. H. van der Burg und B. de Jong. www.wiefm.eu/wp-content/uploads/2019/03/Rapport-ND-fase-3.pdf, abgerufen am 01.08.2019.

Christian Münch GmbH o. J.:

Christian Münch GmbH (Hrsg.) (o. J.): Solarkollektoren. www.solaranlage.eu/solarthermie/solarkollektoren, abgerufen am 04.08.2019.

CLO 2019:

Compendium voor de Leefomgeving (CLO) (2019): Emissies broeikasgassen, 1990-2017. www.clo.nl/sites/default/files/datasets/c-0165-001g-clo-34-nl.xlsx über <https://www.clo.nl/indicatoren/nl0165-broeikasgasemissies-in-nederland>, abgerufen am 28.06.2019.

DEHSt 2019:

Deutsche Emissionshandelsstelle im Umweltbundesamt (DEHSt) (2019): Sanktionierung. Berlin. www.dehst.de/DE/Emissionshandel-verstehen/Sanktionierung/sanktionierung_node.html, abgerufen am 28.06.2019.

Destatis 2019:

Statistisches Bundesamt (Destatis) (Hrsg.) (2019): Publikation Alle politisch selbständigen Gemeinden mit ausgewählten Merkmalen am 30.06.2019 (2. Quartal 2019). www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Regionales/Gemeindeverzeichnis/Administrativ/Archiv/GVAuszugQ/AuszugGV2QAktuell.html, abgerufen am 17.08.2019.

Deutscher Bundestag 2018:

Deutscher Bundestag (Hrsg.) (2018): Aktuelle Klimaschutzziele auf internationaler, europäischer und nationaler Ebene. Nominale Ziele und Rechtsgrundlagen. www.bundestag.de/resource/blob/543798/743f401f49bea64a7af491c6d9a0b210/wd-8-009-18-pdf-data.pdf, abgerufen am 20.08.2019.

DFIC 2017:

Dr. Fromme International Consulting (DFIC) (Hrsg.) (2017): Untersuchung von alternativen Wärmeversorgungspotenzialen im Industriepark Nord.Westfalen. www.wiefm.eu/wp-content/uploads/2018/02/SWC_Bericht-Potenziale-zur-W%C3%A4rmeversorgung-IPNW_2017_12_18_DFIC_final.pdf, abgerufen am 01.08.2019.

Dodds u. a. 2015:

Dodds, Paul E.; Staffell, Iain; Hawkes, Adam D.; Li, Francis; Grünewald, Philipp; McDowall, Will; Ekins, Paul (2015): Hydrogen and fuel cell technologies for heating: A review. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 40 (5), S. 2065–2083. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.11.059.

Duedahl 2019:

Duedahl, Morten Jordt (2019): District Heating – an Important part of a Sustainable Future. Urban Heating Infrastructures in North Rhine-Westphalia and Denmark Danish Board of District Heating (DBDH). Energieagentur.NRW (EA.NRW); NRW.Bank. Düsseldorf, 14.05.2019.

EA Lippe 2017:

Energieagentur Lippe GmbH (EA Lippe) (Hrsg.) (2017): Wärmeversorgung eines Neubaugebietes in Warendorf. Zukunftsfähige Energieversorgung durch Stadtwerke Warendorf GmbH. Unter Mitarbeit von Frank Senge. Oerlinghausen. www.wiefm.eu/wp-content/uploads/2018/01/Konzept-zur-W%C3%A4rmeversorgung-des-BG-KvG-Stra%C3%9Fe-WiEfm.pdf, abgerufen am 01.08.2019.

Ecovat 2018:

Ecovat® Seasonal Thermal Energy Storage (Ecovat) (Hrsg.) (2018): Projects. www.ecovat.eu/projects/, abgerufen am 25.08.2019.

EEX 2017:

European Energy Exchange AG (EEX) (2017): European Emission Allowances (EUA). www.eex.com/en/market-data/environmental-markets/spot-market/european-emission-allowances#!/2019/06/28, abgerufen am 28.06.2019.

Ekwadraat BV 2019:

Ekwadraat BV (Hrsg.) (2019): Evaluatie van de mogelijkheden die de ondergrond van de gemeente Hengelo biedt voor warmtetoepassingen – een quickscan. Gemeente Hengelo. Unter Mitarbeit von F. van Bergen. Leeuwarden. www.wiefm.eu/wp-content/uploads/2019/04/quickscan-ondergrond-Hengelo-voor-warmtetoepassingen_definitief_15-3.pdf, abgerufen am 01.08.2019.

Enercon 2016:

ENERCON GmbH (Enercon) (2016): E-126ENERCON GmbH (Enercon). www.enercon.de/produkte/ep-8/e-126/, abgerufen am 10.05.2019.

Energethik 2017:

Energethik Ingenieurgesellschaft mbH (Energethik) (Hrsg.) (2017): Abschlussbericht Machbarkeitsstudie Solare Biowärme für Greven (48268, Steinfurt). Unter Mitarbeit von Robert Wasser, Sascha Michaelis und Daniel Hahn. Osnabrück. www.wiefm.eu/wp-content/uploads/2018/01/180108_Abschlussbericht_Solare_Biow%C3%A4rme_Greven.pdf, abgerufen am 01.08.2019.

energielenker 2018a:

energielenker Beratungs GmbH (energielenker) (Hrsg.) (2018): Energiekonzept Neubaugebiet „Am Überweg“. Abschlussbericht. Greven. www.wiefm.eu/wp-content/uploads/2018/11/Abschlussbericht-Sch%C3%B6ppingen.pdf, abgerufen am 01.08.2019.

energielenker 2018b:

energielenker Beratungs GmbH (energielenker) (Hrsg.) (2018): Energiekonzept Neubaugebiet „ehemaliges Schmeing-Gelände“. Abschlussbericht. Greven. www.wiefm.eu/wp-content/uploads/2019/03/Abschlussbericht-Borken.pdf, abgerufen am 01.08.2019.

EU 2009a:

Europäische Union (EU) (23.04.2009): Entscheidung Nr. 406/2009/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 über die Anstrengungen der Mitgliedstaaten zur Reduktion ihrer Treibhausgasemissionen mit Blick auf die Erfüllung der Verpflichtungen der Gemeinschaft zur Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2020. ENTSCHEIDUNG Nr. 406/2009/EG. In: *Amtsblatt der Europäischen Union* (L 140), S. 136–148. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32009D0406>, abgerufen am 28.06.2019.

EU 2009b:

Europäische Union (EU) (23.04.2009): Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG. RL 2009/28/EG. In: *Amtsblatt der Europäischen Union* (L 140), S. 16–62. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX:32009L0028>, abgerufen am 28.06.2019.

EU 2011:

Europäische Union (EU) (2011): Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO₂-armen Wirtschaft bis 2050. MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN (KOM(2011) 112). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52011DC0112>, abgerufen am 27.04.2019.

EU 2012:

Europäische Union (EU) (25.10.2012): Richtlinie 2012/27/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz, zur Änderung der Richtlinien 2009/125/EG und 2010/30/EU und zur Aufhebung der Richtlinien 2004/8/EG und 2006/32/EG Text von Bedeutung für den EWR. RL 2012/27/EU. In: *Amtsblatt der Europäischen Union* (L 315), S. 1–56. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32012L0027&qid=1561728438715>, abgerufen am 28.06.2019.

EU 2014:

Europäische Union (EU) (24.10.2014): European Council 23/24 October 2014 – Conclusions. EUCO 169/14.
www.consilium.europa.eu/uedocs/cms_data/docs/pressdata/en/ec/145397.pdf, abgerufen am 27.04.2019.

EU 2016:

Europäische Union (EU): ÜBEREINKOMMEN VON PARIS (Übersetzung). In: *Amtsblatt der Europäischen Union* (L 282), S. 4–18. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:22016A1019\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:22016A1019(01)), abgerufen am 03.05.2019.

EU 2018a:

Europäische Union (EU) (30.05.2018): Verordnung (EU) 2018/842 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Festlegung verbindlicher nationaler Jahresziele für die Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Zeitraum 2021 bis 2030 als Beitrag zu Klimaschutzmaßnahmen zwecks Erfüllung der Verpflichtungen aus dem Übereinkommen von Paris sowie zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 525/2013. Verordnung 2018/842/EU. In: *Amtsblatt der Europäischen Union* (L 156), S. 26–42. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32018R0842>, abgerufen am 28.06.2019.

EU 2018b:

Europäische Union (EU) (11.12.2018): Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources. Directive 2018/2001/EU. In: *Amtsblatt der Europäischen Union* (L 328), S. 82–209. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=EN>, abgerufen am 27.04.2019.

EU 2018c:

Europäische Union (EU) (11.12.2018): RICHTLINIE (EU) 2018/ 2002 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES - vom 11. Dezember 2018 - zur Änderung der Richtlinie 2012/ 27/ EU zur Energieeffizienz. RL 2018/2002/EU. In: *Amtsblatt der Europäischen Union* (L 328), S. 210–230. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv%3AOJ.L_.2018.328.01.0210.01.ENG, abgerufen am 27.04.2019.

EU 2018d:

Europäische Union (EU) (11.12.2018): VERORDNUNG (EU) 2018/1999 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 11. Dezember 2018 über das Governance-System für die Energieunion und für den Klimaschutz, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 663/2009 und (EG) Nr. 715/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates, der Richtlinien 94/22/EG, 98/70/EG, 2009/31/EG, 2009/73/EG, 2010/31/EU, 2012/27/EU und 2013/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates, der Richtlinien 2009/119/EG und (EU) 2015/652 des Rates und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 525/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates. Verordnung (EU) 2018/1999. In: *Amtsblatt der Europäischen Union* (L 328), S. 1–77. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/de/TXT/?uri=CELEX%3A32018R1999>, abgerufen am 23.06.2019.

EU-Kom o. J.:

Europäische Kommission (EU-Kom) (o. J.): Energy Efficiency. Saving energy, saving money. <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency>, abgerufen am 28.06.2019.

EU-Kom 2016:

Europäische Kommission (EU-Kom) (2016): Klima- und Energiepaket 2020. https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_de#tab-0-0, abgerufen am 28.06.2019.

EU-Kom 2019:

Europäische Kommission (EU-Kom) (2019): Assessment of the National Energy and Climate Plan of the Netherlands. Brüssel. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/nl_swd_en.pdf, abgerufen am 28.06.2019.

EUREGIO o. J.:

Deutsch-niederländischer Zweckverband EUREGIO (EUREGIO) (Hrsg.) (o. J.): EUREGIO– Aangesloten Gemeenten / Mitgliedskommunen. www.euregio.eu/sites/default/files/downloads/EUREGIO%20-%20Aangesloten%20gemeenten_Mitgliedskommunen.pdf, abgerufen am 17.08.2019.

EUREGIO 2011:

Deutsch-niederländischer Zweckverband EUREGIO (EUREGIO) (2011): EUREGIO Imagebroschüre. www.euregio.eu/sites/default/files/downloads/EUR110404%20Imagebrosch%C3%BCre%20web.pdf, abgerufen am 18.04.2019.

EUREGIO 2016a:

Deutsch-niederländischer Zweckverband EUREGIO (EUREGIO) (2016): Karte_EUREGIO INFO_web_0. www.euregio.eu/sites/default/files/downloads/EUREGIO%20INFO_web_0.pdf, abgerufen am 20.04.2019.

EUREGIO 2016b:

Deutsch-niederländischer Zweckverband EUREGIO (EUREGIO) (Hrsg.) (2016): Gemeenten, Waterschappen en Kreise in het EUREGIO-gebied/ Kommunen und Waterschappen im EUREGIO-Gebiet.

www.euregio.eu/sites/default/files/downloads/Gemeenten%2C%20Waterschappen%20en%20Kreise%20met%20internetadres%20%2805.10.2016%29.pdf, abgerufen am 17.08.2019.

EUREGIO 2019:

Deutsch-niederländischer Zweckverband EUREGIO (EUREGIO) (2019): Region & Mitglieder. Hrsg. v. Deutsch-niederländischer Zweckverband EUREGIO (EUREGIO). www.euregio.eu/de/über-euregio/region-mitglieder, abgerufen am 21.06.2019.

Euroheat & Power 2011:

Euroheat & Power (2011): Nutzung der Prozesswärme in der europäischen Industrie nach Temperaturen (in Prozent). In: *Handelsblatt* (via Statista) (110), S. 52.

www.statista.com/statistik/daten/studie/190224/umfrage/prozesswaerme-temperaturen-in-der-europaeischen-industrie/, abgerufen am 17.08.2019.

EZK 2016:

Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) (Hrsg.) (2016): Energierapport. Transitie naar duurzaam.

www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2016/01/18/energierapport-transitie-naar-duurzaam, abgerufen am 20.08.2019.

FfE 2011:

Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH (FfE) (Hrsg.) (2011): Hybride Heizsysteme mit nichtleitungsgebundenen Energieträgern und Strom. Technische Konzepte, Wirtschaftlichkeit und Potenziale. Unter Mitarbeit von Dominik Bernhard und Christian Fieger. www.zukunftsheizen.de/fileadmin/user_upload/Downloads/FfE-Studie_Hybride_Heizsysteme_IWO.pdf, abgerufen am 20.08.2019.

FH Münster o. J.:

FH Münster (Hrsg.) (o. J.): Wärme in der EUREGIO - fokussieren und modernisieren. Machbarkeitsstudien. www.wiefm.eu/startseite/ergebnisse/machbarkeitsstudien/, abgerufen am 02.07.2019.

FH Münster 2018a:

FH Münster (Hrsg.) (2018): Rijn-IJssel: Kansenskaart. www.wiefm.eu/rijn-ijssel-kansenskaart/, abgerufen am 21.08.2019.

FH Münster 2018b:

FH Münster (Hrsg.) (2018): Wärmenetzbenchmark. Qualitativer Vergleich bestehender Wärmenetze. Unter Mitarbeit von Christof Wetter, Elmar Brüggling, Hinnerk Willenbrink und Klaus Russell-Wells. Steinfurt. www.wiefm.eu/wp-content/uploads/2017/11/2018-02-20-Bericht-W%C3%A4rmenetzbenchmark_web.pdf, abgerufen am 22.07.2019.

FH Münster 2019:

FH Münster (Hrsg.) (2019): Wärmenetze im Münsterland. Grundlagen für kommunalspezifische Entscheidungsstrategien. Unter Mitarbeit von Christof Wetter, Elmar Brüggling, Hinnerk Willenbrink, Klaus Russell-Wells und Christian Käufler. Steinfurt. www.wiefm.eu/wp-content/uploads/2019/02/W%C3%A4rmenetze-im-M%C3%BCnsterland-Entscheidungsstrategien-f%C3%BCr-Kommunen.pdf, abgerufen am 12.08.2019.

FNR o. J.-a:

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (Hrsg.) (o. J.-): Bio-Gas-Kessel. <https://heizen.fnr.de/biomasseanlagen/heizkessel/bio-gas-kessel/>, abgerufen am 01.08.2019.

FNR o. J.-b:

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (Hrsg.) (o. J.-): Scheitholzkessel. <https://heizen.fnr.de/biomasseanlagen/heizkessel/scheitholzkessel/>, abgerufen am 02.08.2019.

FNR 2013:

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (Hrsg.) (2013): Pelletheizungen. 7. Aufl. Gülzow-Prüzen. www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/mu_pellet_web.pdf, abgerufen am 02.08.2019.

FNR 2017:

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (Hrsg.) (2017): Hackschnitzelheizungen. 5. Aufl. Gülzow-Prüzen. www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/hackschnitzelheizungen_web_2017.pdf, abgerufen am 02.08.2019.

Gaudard u. a. 2017:

Gaudard, Adrien; Schmid, Martin; Wüest, Alfred (2017): Thermische Nutzung von Oberflächengewässern. Mögliche physikalische und ökologische Auswirkungen der Wärme- und Kältenutzung. In: *Aqua & Gas* (5), S. 40–45. www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/News/2017/03/16/thermische_nutzung_a_g.pdf, abgerufen am 19.07.2019.

GD NRW o. J.:

Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen - Landesbetrieb (GD NRW) (Hrsg.) (o. J.):
Geothermie in NRW. Standortcheck.

www.geothermie.nrw.de/geothermie_basisversion/?lang=de, abgerufen am 15.08.2019.

Gertec 2017:

Gertec GmbH Ingenieurgesellschaft (Gertec) (Hrsg.) (2017):

Wärmeversorgungskonzept für die Konversionsfläche der General-Wever-Kaserne („Eschendorfer Aue“-)Endbericht. Stadt Rheine. Essen. www.wiefm.eu/wp-content/uploads/2017/11/Endbericht-General-Wever-Kaserne-Rheine.pdf, abgerufen am 01.08.2019.

HMAP BV 2017:

HMAP BV (Hrsg.) (2017): Resultaat en rapportenonderzoek naar haalbaarheid collectief warmtenet op het Industrieterein 't Panhuis. Ochten. www.wiefm.eu/wp-content/uploads/2018/01/HMAP_warmtevoucher_Industrieterein_Kesteren.pdf, abgerufen am 01.08.2019.

IF Technology 2017:

IF Technology (Hrsg.) (2017): Potentieel thermische energie uit oppervlaktewater (TEO). Beheergebied van Waterschap Rijn en IJssel. Unter Mitarbeit von Edzard Gelderman. Arnhem. www.wiefm.eu/wp-content/uploads/2018/02/Energie-uit-oppervlaktewater-WRIJ-7-juli-2017.pdf, abgerufen am 01.08.2019.

iNeG 2017a:

IngenieurNetzwerk Energie eG (iNeG) (Hrsg.) (2017): Konzeptstudie Nahwärmeversorgung Dorfbauernschaft Hoetmar. Bad Iburg. www.wiefm.eu/wp-content/uploads/2017/11/170801-Konzeptstudie-W%C3%A4rmeversorgung-Hoetmar-Dorfbauernschaft.pdf, abgerufen am 01.08.2019.

iNeG 2017b:

IngenieurNetzwerk Energie eG (iNeG) (Hrsg.) (2017): Energiekonzepte für Warendorf. Neubaugebiet „Zwischen In de Brinke und Stadtstraße Nord“ mit Ausblick einer Erweiterung des Nahwärmenetzes. Bad Iburg. www.wiefm.eu/wp-content/uploads/2018/01/Abschlusspr%C3%A4sentation-Warendorf-In-de-Brinke-WiEfm.pdf, abgerufen am 01.08.2019.

iNeG 2018:

IngenieurNetzwerk Energie eG (iNeG) (Hrsg.) (2018): Wärmenetz Ladbergen. Untersuchung von verschiedenen Varianten zur Wärmeversorgung in Ladbergen. Machbarkeitsstudie. Unter Mitarbeit von Christoph Runden. Bad Iburg. www.wiefm.eu/wp-content/uploads/2018/12/Endbericht-W%C3%A4rmenetz-Ladbergen.pdf, abgerufen am 01.08.2019.

Inenergie u. ROM3D 2019:

Inenergie; ROM3D (Hrsg.) (2019): Energie uit Oppervlaktewater. Wanneer is het interessant? www.rom3d.nl/EnergieUitOppervlaktewater/managementsamenvatting-def.pdf, abgerufen am 21.08.2019.

IWU (o. J.):

Institut für Wohnen und Umwelt (IWU) (Hrsg.) ((o. J.)): TABULA WebTool. <http://webtool.building-typology.eu/>, abgerufen am 28.07.2019.

IWU 2013:

Institut für Wohnen und Umwelt (IWU) (2013): DE - Residential Building Typology. Building Type Matrix. DE Germany - Country Page. <http://episcopes.eu/building-typology/country/de>, abgerufen am 01.07.2019.

IWU 2014:

Institut für Wohnen und Umwelt (IWU) (2014): NL - Residential Building Typology. Building Type Matrix. NL The Netherlands - Country Page. <http://episcopes.eu/building-typology/country/nl>, abgerufen am 01.07.2019.

IWU 2015:

Institut für Wohnen und Umwelt (IWU) (2015): Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. erarbeitet im Rahmen der EU-Projekte TABULA - "Typology approach for building stock energy assessment", EPISCOPE - "Energy performance indicator tracking schemes for the continuous optimisation of refurbishment processes in European housing stocks". Unter Mitarbeit von Tobias Loga, Britta Stein, Nikolaus Diefenbach und Rolf Born. 2., erw. Aufl. Darmstadt: IWU. www.building-typology.eu/downloads/public/docs/brochure/DE_TABULA_TypologyBrochure_IWU.pdf, abgerufen am 01.07.2019.

Kaltschmitt u. a. 2016:

Kaltschmitt, Martin; Hartmann, Hans; Hofbauer, Hermann (2016): Energie aus Biomasse. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

kiEMT 2019a:

Stichting Kiemt (kiEMT) (Hrsg.) (2019): Wärmegutscheinbuch. Wärme in der EUREGIO fokussieren & modernisieren. www.wiefm.eu/wp-content/uploads/2019/03/Brochure-WiEfm-DU_2019_digitaal.pdf, abgerufen am 01.08.2019.

kiEMT 2019b:

Stichting Kiemt (kiEMT) (Hrsg.) (2019): WiEfm analyse toekomstige warmteontwikkelingen. Een analyse in het kader van future workshops over de toekomstige warmteontwikkelingen en strategieën. Unter Mitarbeit von Bas Grol, Helena Bühler und Rico Grol. www.wiefm.eu/wp-content/uploads/2019/06/1018293-002-WiEfm-kosten-en-batenanalyse-warmtemarkt.pdf, abgerufen am 22.07.2019.

LANUV 2019:

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) (Hrsg.) (2019): Energieatlas NRW. Solarkataster.
www.energieatlas.nrw.de/site/karte_solarkataster, abgerufen am 14.08.2019.

Liandon 2019:

Liandon B.V. (Liandon) (Hrsg.) (2019): Uitbreiding Multatulilaan Culemborg. Globale haalbaarheidsstudie. Unter Mitarbeit von Rolf Broekmanen und Ivo Smits. Duiven.
www.wiefm.eu/wp-content/uploads/2019/03/Eindpresentatie-Haalbaarheidsstudie-Uitbreiding-Multatulilaan-ThermoBello-20190328-openbare-versie.pdf, abgerufen am 01.08.2019.

Lund u. a. 2014a:

Lund, Henrik; Werner, Sven; Wiltshire, Robin; Svendsen, Svend; Thorsen, Jan Eric; Hvelplund, Frede; Mathiesen, Brian Vad (2014): 4th Generation District Heating (4GDH). In: *Energy* 68, S. 1–11. DOI: 10.1016/j.energy.2014.02.089.

Lund u. a. 2014b:

Lund, Henrik; Mathiesen, Brian Vad; Connolly, David; Østergaard, Poul A. (2014): Renewable energy systems - a smart energy systems approach to the choice and modelling of 100 % renewable solutions, (39), S. 1–6.

Lund u. Mathiesen 2009:

Lund, H.; Mathiesen, B. V. (2009): Energy system analysis of 100% renewable energy systems—The case of Denmark in years 2030 and 2050. In: *Energy* 34 (5), S. 524–531. DOI: 10.1016/j.energy.2008.04.003.

Niederlande 2018:

Niederlande (2018): Draft Integrated National Energy and Climate Plan 2021-2030. The Netherlands.
https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/netherlands_draftnecp.pdf, abgerufen am 23.06.2019.

Over Morgen 2019:

Over Morgen (Hrsg.) (2019): Warmtenet Kerschoten. Onderzoek mogelijkheden realisatie. Unter Mitarbeit von M. van Lier und S. Kop. www.wiefm.eu/wp-content/uploads/2019/02/190125-Rapportage-Apeldoorn-Kerschoten_def2.pdf, abgerufen am 01.08.2019.

Paschotta 2010a:

Paschotta, Rüdiger (2010): Wärmepumpe. www.energielexikon.info/waermepumpe.html, zuletzt aktualisiert am 10.05.2019, abgerufen am 04.08.2019.

Paschotta 2010b:

Paschotta, Rüdiger (2010): Pufferspeicher. www.energielexikon.info/pufferspeicher.html, zuletzt aktualisiert am 03.11.2018, abgerufen am 30.07.2019.

Paschotta 2010c:

Paschotta, Rüdiger (2010): Sonnenkollektor. www.energielexikon.info/sonnenkollektor.html, zuletzt aktualisiert am 03.11.2018, abgerufen am 15.08.2019.

Paschotta 2012a:

Paschotta, Rüdiger (2012): Eisspeicher. www.energielexikon.info/eisspeicher.html, zuletzt aktualisiert am 23.07.2019, abgerufen am 30.07.2019.

Paschotta 2012b:

Paschotta, Rüdiger (2012): Absorptionswärmepumpe. www.energielexikon.info/absorptionswaermepumpe.html, zuletzt aktualisiert am 21.02.2017, abgerufen am 04.08.2019.

Paschotta 2013:

Paschotta, Rüdiger (2013): Erdwärmesonde. www.energielexikon.info/erdwaermesonde.html, zuletzt aktualisiert am 10.05.2019, abgerufen am 04.08.2019.

Paschotta 2015:

Paschotta, Rüdiger (2015): Erdregister. www.energielexikon.info/erdregister.html, zuletzt aktualisiert am 03.11.2018, abgerufen am 04.08.2019.

Paschotta 2017:

Paschotta, Rüdiger (2017): Photovoltaisch-thermischer Solarkollektor. www.energielexikon.info/photovoltaisch_thermischer_solarkollektor.html, zuletzt aktualisiert am 03.11.2018, abgerufen am 17.08.2019.

pbr NETZenergie 2019:

pbr NETZenergie GmbH (pbr NETZenergie) (Hrsg.) (2019): Machbarkeitsstudie Nahwärmenetz Ibbenbüren. Unter Mitarbeit von Tobias Peselmann. Osnabrück. www.wiefm.eu/wp-content/uploads/2019/01/Machbarkeitsstudie_W%C3%A4rmegutschein_Bericht_Stadt-Ibbenb%C3%BCren.pdf, abgerufen am 01.08.2019.

Provincie Drenthe o. J.:

Provincie Drenthe (Hrsg.) (o. J.): WKO-systemen. www.provincie.drenthe.nl/bodemenergie/bodemenergiesystemen/wko-systemen/, abgerufen am 15.08.2019.

Reich u. Reppich 2018:

Reich, Gerhard; Reppich, Marcus (2018): Regenerative Energietechnik. Überblick über ausgewählte Technologien zur nachhaltigen Energieversorgung. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-20608-6>.

Renoth 2019:

Renoth, Patrizia (2019): Fernwärme in Dänemark. Von fossilen Brennstoffen zu grünen Brennstoffen und grünem Strom. Urban Heating Infrastructures in North Rhine-Westphalia and Denmark Danish Energy Agency. Energieagentur.NRW (EA.NRW); NRW.Bank. Düsseldorf, 14.05.2019.

ReUseHeat 2017:

ReUseHeat (Hrsg.) (2017): ReUseHeat. www.reuseheat.eu, abgerufen am 22.08.2019.

RVO.nl o. J.-a:

Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO.nl) (Hrsg.) (o. J.-): The Ecovat energy storage. Energy innovation projects. <https://english.rvo.nl/initiatives/energy-innovation-projects/ecovat-energy-storage>, abgerufen am 20.08.2019.

RVO.nl o. J.-b:

Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO.nl) (Hrsg.) (o. J.-): WarmteAtlas. <http://rvo.b3p.nl/viewer/app/Warmteatlas/v2>, abgerufen am 21.08.2019.

RVO.nl o. J.-c:

Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO.nl) (Hrsg.) (o. J.-): WKOtool. <https://wkotool.nl/>, abgerufen am 14.08.2019.

Saxion 2019:

Saxion Hogeschool (Saxion) (Hrsg.) (2019): Warmtenetten: Technische karakterisering. WIEfm Rapport werkpakket 4. Unter Mitarbeit von T.J.G. Papa, S. I. Wijnant-Timmerman und R. P. van Leeuwen. www.wiefm.eu/wp-content/uploads/2019/05/eindrapport-wiefm-WP4-technische-karakterisering.pdf, abgerufen am 22.07.2019.

Seeger 2018:

Seeger Engineering GmbH (Seeger) (Hrsg.) (2018): Machbarkeitsstudie über die Bestandsaufnahme der Anlagentechnik in Bezug auf Brennstoffversorgung, Wärmeerzeugung und -verteilung sowie der Erstellung eines Energiekonzeptes für die zukünftige Wärmeversorgung. Unter Mitarbeit von Heiko Hupfeld und Tim Steindamm. Hessisch Lichtenau. www.wiefm.eu/wp-content/uploads/2018/12/180129_Energiekonzept-Parador_EF_hhu_cdi_tst.pdf, abgerufen am 01.08.2019.

Singh 2013:

Singh, Girish Kumar (2013): Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: A review. In: *Energy* 53, S. 1–13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.02.057>.

Solites 2014:

Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme (Solites) (Hrsg.) (2014): Erdbecken-Wärmespeicher. Aufbau. Unter Mitarbeit von Dirk Mangold und Antonia Dohna.

www.saisonalspeicher.de/Speichertypen/Erdbecken/Aufbau/tabid/137/Default.aspx, abgerufen am 20.08.2019.

Sonnenhaus-Institut e.V. o. J.:

Sonnenhaus-Institut e.V. (Hrsg.) (o. J.): Sonnenheizung. Das Strahlungsangebot der Sonne. Unter Mitarbeit von Wolfgang Hilz. www.sonnenhaus-institut.de/solarheizung/solaranlage-heizkonzept.html, abgerufen am 30.07.2019.

Sweco 2018:

Sweco (Hrsg.) (2018): Warmtestudie Calluna zwembad en wijk van de toekomst gemeente Ermelo. Unter Mitarbeit von Tijmen Klip. De Bilt. www.wiefm.eu/wp-content/uploads/2019/02/o-Endbericht-Ermelo-SWNL0231356-revisie-4-publicatie.pdf, abgerufen am 01.08.2019.

Syntraal 2019:

Syntraal (Hrsg.) (2019): Haalbaarheid riothermie Matchpoint Putten. Unter Mitarbeit von Lieke Noij und Geert van Rens. Deventer. www.wiefm.eu/wp-content/uploads/2019/03/R001-1264403SCB-V02-avd-NL.pdf, abgerufen am 01.08.2019.

Tauw 2017:

Tauw BV (Tauw) (Hrsg.) (2017): Afkoppelen gasnet Benedenbuurt, gemeente Wageningen. Haalbaarheid van een warmtenet. Unter Mitarbeit von Harry de Brauw und Marion van Amelrooij. Deventer. www.wiefm.eu/wp-content/uploads/2018/02/Eindrapportage-BHS-Benedenbuurt-gasloos-TAUW.pdf, abgerufen am 01.08.2019.

Tauw 2018:

Tauw BV (Tauw) (Hrsg.) (2018): Evaluatie duurzame restwarmte Wezep inzake de WiEfm-voucher. Unter Mitarbeit von Simon Bos und Barry Meddeler. Deventer. www.wiefm.eu/wp-content/uploads/2018/10/Voucher-Sportfondsen-Oldebroek_-Evaluatie-restwarmte-Wezep-24052018.pdf, abgerufen am 01.08.2019.

UBA 2011:

Umweltbundesamt (UBA) (2011): Stellungnahme des UBA - Energiesparen bei der Warmwasserbereitung - Vereinbarkeit von Energieeinsparung und Hygieneanforderungen an Trinkwasser.

www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/419/dokumente/warmwasserbereitung_energiesparen_stellungnahme_uba.pdf, abgerufen am 28.07.2019.

UBA 2013:

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2013): Strom- und Wärmeversorgung einer Siedlung bei unterschiedlichen Energieeffizienz-Standards. Unter Mitarbeit von Jens Schubert und Katja Tschetschorke. Dessau-Roßlau.

www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/climate_change_10_2013_strom-und_warmeversorgung_einer_siedlung_bf_0.pdf, abgerufen am 21.08.2019.

UBA 2015:

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2015): Geothermie. Tiefe Geothermie.

www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/geothermie#textpart-2, abgerufen am 15.08.2019.

UBA 2018:

Umweltbundesamt (UBA) (2018): Der Europäische Emissionshandel.

www.umweltbundesamt.de/daten/klima/der-europaeische-emissionshandel, zuletzt aktualisiert am 30.08.2018, abgerufen am 28.06.2019.

UBA 2019a:

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2019): Anteil erneuerbarer Energien am Bruttoendenergieverbrauch. Vergleich der Entwicklung der erneuerbaren Energien (nach Energiekonzept) mit dem Ziel der Bundesregierung.

www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/372/bilder/anteil_ee_am_beev_03-2019.png, abgerufen am 21.08.2019.

UBA 2019b:

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2019): Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch, am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte sowie am Endenergieverbrauch im Verkehrssektor. Entwicklung von 1990 bis 2018.

www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/372/bilder/anteil_ee_in_den_sektoren_03-2019.png, abgerufen am 21.08.2019.

UBA u. AGEB 2018a:

Umweltbundesamt (UBA); Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V. (AGEB) (2018): 2_und_4_datentabelle_eev_2018-02-14. Unter Mitarbeit von Detlef Drosihn.

www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/2_und_4_datentabelle_eev_2018-02-14_0.pdf, abgerufen am 08.06.2019.

UBA u. AGEB 2018b:

Umweltbundesamt (UBA); Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V. (AGEB) (2018): Primärenergieverbrauch. Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2017. www.umweltbundesamt.de/indikator-energieverbrauch, abgerufen am 11.05.2019.

UNFCCC 2018:

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (15.12.2018): Report of the Conference of the Parties on its twenty-fourth session, held in Katowice from 3 to 14 December 2018. Addendum. Part two: Action taken by the Conference of the Parties at its twentyfourth session. FCCC/CP/2018/10/Add.1.

<https://unfccc.int/documents/193360>, abgerufen am 03.05.2019.

UNFCCC 2019a:

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2019): Paris Agreement - Status of Ratification. Hrsg. v. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). <https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/status-of-ratification>, abgerufen am 21.06.2019.

UNFCCC 2019b:

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2019): Status of Ratification of the Convention. Hrsg. v. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-convention/status-of-ratification/status-of-ratification-of-the-convention>, abgerufen am 21.06.2019.

Wagner 2013:

Wagner, H.-J. (2013): Introduction to wind energy systems 54, S. 1011. DOI: 10.1051/epjconf/20135401011.

Warmte.nu 2018:

Warmte.nu (Hrsg.) (2018): Bewonersonderzoek Warmte voor Wolfskuil. www.wiefm.eu/wp-content/uploads/2018/12/Stichting-de-Wijkfabrik_-Rapportage-bewonersonderzoek-Wolfskuil-Warmte.nu_.pdf, abgerufen am 01.08.2019.

Watter 2013:

Watter, Holger (2013): Regenerative Energiesysteme. Systemtechnik und Beispiele nachhaltiger Energiesysteme aus der Praxis; mit 51 Tabellen. 3., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg (Lehrbuch).

Wiebes 2018:

Wiebes, Eric (2018): Kamerbrief over aanbidding ontwerp-Klimaatakkoord. Hrsg. v. Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK).

www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2018/12/21/kamerbrief-over-aanbidding-ontwerp-klimaatakkoord, abgerufen am 23.06.2019.

WRIJ 2018:

Waterschap Rijn en IJssel (WRIJ) (Hrsg.) (2018): Thermische energie uit oppervlaktewater. www.wrij.nl/thema/kennis-informatie/waterthema%27-0/energieneutraal/energieneutraal/thermische-energie/, abgerufen am 21.08.2019.

ZEBRA B.V. 2018:

ZEBRA B.V. (Hrsg.) (2018): Duurzame warmte -Zolderpark. Haalbaarheid Solar Energiebooster concept t.b.v. all-electric warmteopwekking. Unter Mitarbeit von C. Savy. Nijmegen. www.wiefm.eu/wp-content/uploads/2018/10/movementsGroup_Zolderpark_Abschlussbericht.pdf, abgerufen am 01.08.2019.

Zech 2015:

Zech, Daniel (2015): Analyse und Bewertung von Technologien für die Versorgung von Wohngebäuden mit Wärme aus erneuerbaren Energien. Ein Beitrag geographischer Energieforschung am Beispiel einer Nachhaltigkeitsbewertung für Wärmeversorgungssysteme. Zugl.: Tübingen, Univ., Diss., 2014. Hamburg: Kovač (Schriftenreihe Studien zur Umweltpolitik, 12).

7.2 Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1:	Karte der EUREGIO (EUREGIO 2016a).....	4
Abb. 2-2:	Verteilung der Einwohnerzahlen der deutschen und niederländischen Gemeinden und Städte der EUREGIO auf die unterschiedlichen Gemeindegrößen (Stand 31.12.2017). Nach CBS (2019a) und Destatis (2019)	8
Abb. 2-3:	Anteil erneuerbarer Energien am Bruttoendenergieverbrauch, am Bruttostromverbrauch, am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte sowie am Endenergieverbrauch im Verkehrssektor in Deutschland. Nach UBA (2019a, 2019b)	17
Abb. 2-4:	Energieverbrauch nach Anwendungsbereichen und Energieträgern in Deutschland im Jahr 2017 (insgesamt 9.239 PJ). Nach (BMWi 2019).....	18
Abb. 2-5:	Endenergieverbrauch (EEV) und Primärenergieverbrauch (PEV) in Deutschland in ausgewählten Jahren seit 1990. Nach (AGEB 2018a; UBA u. AGEB 2018a, 2018b)	19
Abb. 2-6:	Anteil erneuerbarer Energie und Aufteilung auf die Sektoren Strom, Wärme und Verkehr am Bruttoendenergieverbrauch der Niederlande. (CBS 2018)	20
Abb. 2-7:	Wärme aus erneuerbaren Energien im Jahr 2016 in den Niederlanden. Gesamt: 60.615 TJ. Nach CBS (2019c)	21
Abb. 2-8:	Primärenergieverbrauch (PEV) und Endenergieverbrauch (EEV) in den Niederlanden in ausgewählten Jahren seit 1990. Nach CBS (2019b)	22
Abb. 3-1:	Energieverbrauch für Wärmezwecke in Deutschland nach Sektoren 2017. Nach (AGEB 2018b)	23
Abb. 3-2:	Nutzung der Prozesswärme in der europäischen Industrie nach Temperaturen (in Prozent). (Euroheat & Power 2011)	24
Abb. 3-3:	Die Verteilung des Wärmebedarfs nach Temperaturbereichen und Sektoren im Jahr 2012 in den Niederlanden. (EZK 2016, S. 82)	25
Abb. 3-4:	Darstellung des Gebäudeenergiebedarfs von der Primärenergiebereitstellung bis zur Nutzenergie. (Bollin 2009, S. 28)	26
Abb. 3-5:	Verteilung des flächenbezogenen Endenergieverbrauchs des Gebäudebestands in Deutschland nach Baujahren und Prognose des Einsparpotenzials bis zum Jahr 2050. Stand Dezember 2014. (BMWi 2014, S. 12)	28
Abb. 3-6:	Schematischer Aufbau typischer Bereitstellungsketten zur End- bzw. Nutzenergiebereitstellung aus Biomasse. (Kaltschmitt u. a. 2016, S. 4).....	34
Abb. 3-7:	Erzielte Temperaturen aus erneuerbaren Wärmequellen. (AEE 2017)	38

Abb. 3-8: Darstellung und Vergleich der vier Generationen (1G bis 4G) der leitungsgebundenen Wärmeversorgung nach (Lund u. a. 2014a, S. 9).....	47
Abb. 3-9: Endenergiebedarf eines Einfamilienhauses aus dem Bestand für Heizung und Warmwasser in monatlicher Auflösung (FfE 2011, S. 12)	48
Abb. 3-10: Chronologischer und absteigender Nutzwärmelastgang (normiert für Heizung und Warmwasser) sowie Endenergiebedarf eines bestehenden Einfamilienhauses (EFH) (unsaniert) (FfE 2011, S. 17)	49
Abb. 3-11: Realisierte Stromerzeugung aus Windkraft und Photovoltaik in Deutschland im Jahr 2018, wöchentliche Auflösung. Nach (BNetzA 2019).....	50
Abb. 3-12: Realisierte Stromerzeugung aus Windkraft und Photovoltaik in Deutschland über drei Winter- und drei Sommertage im Jahr 2018, viertelstündliche Auflösung. Nach (BNetzA 2019).....	50
Abb. 3-13: Gegenüberstellung von Solarangebot in Abhängigkeit von der Solarkollektorneigung und Wärmebedarf im jahreszeitlichen Verlauf. (Sonnenhaus-Institut e.V. o. J.)	51
Abb. 4-1: Untergliederung der fünf Hauptkomponenten-Kategorien des morphologischen Kastens auf die einzelnen Technologien mit weiterer Kategorisierung	80
Abb. 4-2: Darstellung des Wärmeversorgungssystems der Machbarkeitsstudie Greven_1 im morphologischen Kasten	81

7.3 Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1:	Emissionen und Emissionsziele in den Handlungsfeldern aus der Zieldefinition des Klimaschutzplans der Bundesregierung. (BMU 2016, S. 33)	13
Tab. 2-2:	Klimapolitische Ziele der Bundesregierung. Nach Deutscher Bundestag (2018)	14
Tab. 3-1:	Baualtersklassen von Wohngebäuden in Deutschland und den Niederlanden. (IWU 2013, 2014).....	27
Tab. 3-2:	Anzahl und Anteil der Wohnungen nach Gebäudetyp in Deutschland und den Niederlanden (IWU 2013, 2014). Siehe auch Anh. 3.....	27
Tab. 3-3:	Kriterien zur Bewertung und zum Vergleich von Wärmeversorgungssystemen	67
Tab. 3-4:	Bewertung der Wärmetechniken WiEfm-Machbarkeitsstudien. (kiEMT 2019b).....	71
Tab. 4-1:	Morphologischer Kasten zur übersichtlichen Darstellung verschiedener Technologie-Kombinationen bei nachhaltigen Wärmeversorgungssystemen	78

7.4 Abkürzungsverzeichnis

<i>BBSR</i>	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
<i>BGA</i>	Biogasanlage
<i>BHKW</i>	Blockheizkraftwerk
<i>CH₄</i>	Methan
<i>CO₂</i>	Kohlenstoffdioxid
<i>CO₂Äq.</i>	Kohlenstoffdioxid-Äquivalent
<i>COP</i>	Conference of the Parties – Vertragsstaatenkonferenz
<i>EEG</i>	Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien – kurz: Erneuerbare-Energien-Gesetz
<i>EEV</i>	Endenergieverbrauch
<i>EEWärmeG</i>	Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich – kurz: Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
<i>EFH</i>	Einfamilienhaus
<i>EHS</i>	Emissionshandelssystem
<i>EnEV</i>	Energieeinspar-Verordnung
<i>EU</i>	Europäische Union
<i>FAME</i>	Fatty Acid Methyl Ester
<i>GHD</i>	Gewerbe, Handel und Dienstleistungen
<i>GIS</i>	geographisches Informationssystem
<i>GMH</i>	großes Mehrfamilienhaus
<i>GuD-Prozess</i>	Gas- und Dampf-Prozess
<i>H₂O</i>	Wasser
<i>HHS</i>	Holzhackschnitzel
<i>IPCC</i>	Intergovernmental Panel on Climate Change – Weltklimarat
<i>KWK</i>	Kraft-Wärme-Kopplung

<i>MFH</i>	Mehrfamilienhaus
<i>NECP</i>	National Energy and Climate Plan – nationaler Energie- und Klimaplan
<i>NH₃</i>	Ammoniak
<i>NMVOOC</i>	non-methane volatile organic compounds – flüchtige organische Verbindungen
<i>NO_x</i>	Stickoxide
<i>PCM</i>	Phase Change Material – Phasenwechselmaterial
<i>PER</i>	Primary Energy Ratio – Primärenergieverhältnis
<i>PEV</i>	Primärenergieverbrauch
<i>PV</i>	Photovoltaik
<i>RH</i>	Reihenhaus
<i>SO₂</i>	Schwefeldioxid
<i>TEO</i>	Thermische Energie aus Oberflächenwasser
<i>THG</i>	Treibhausgas
<i>UNCED</i>	United Nations Conference on Environment and Development – Konferenz der Vereinten Nationen über Umwelt und Entwicklung
<i>UNFCCC</i>	United Nations Framework Convention on Climate Change – Klimarahmenkonvention
<i>WKA</i>	Windkraftanlagen
<i>WKO</i>	Warmte Koude Opslag (niederländisch) – Aquifer-Speicher
<i>WP</i>	Wärmepumpe

ANHANG

VERZEICHNIS DER ANHÄNGE

- Anh. 1: Liste der Gemeinden und (Land-) Kreise in der EUREGIO mit Bevölkerungszahlen und Klassifizierung sowie Zusammenfassung nach Gebiet. Nach (CBS 2019a; Destatis 2019; EUREGIO o. J., 2016b)
- Anh. 2: Anzahl der Wohngebäude in Deutschland (Stand Mai 2011) (IWU 2013)
- Anh. 3: Anzahl der Wohnungen in Deutschland (Stand Mai 2011) (IWU 2013)
- Anh. 4: Wohnfläche in Deutschland (Stand Mai 2011) (IWU 2013)
- Anh. 5: Verknüpfung von Wohnfläche des Gebäudebestands und flächenbezogenem Energiebedarf des Gebäudebestands in Deutschland
- Anh. 6: Anzahl und Prozentsatz der Machbarkeitsstudien aus WiEfm, die die entsprechende Technik in der ersten Spalte zur Wärmeversorgung mit betrachtet hat.
- Anh. 7: Auswertung der deutschen und niederländischen Machbarkeitsstudien des WiEfm-Projekts bezüglich nachhaltiger Wärmeversorgungslösungen
- Anh. 8: Bewertungskriterien für Energieversorgungssysteme nach Reich u. Reppich (2018, S. 31–32)
- Anh. 9: Übersicht über die Nachhaltigkeitsindikatoren der multikriteriellen Entscheidungsanalyse von Zech. (Zech 2015, S. 40)
- Anh. 10: Übersicht über Schadenskategorien und zugehörige Emissionen von Zech. (Zech 2015, S. 80)
- Anh. 11: Faktoren zur Charakterisierung von Wärmenetzen nach Saxion (2019)
- Anh. 12: Darstellung der sechs Wärmeversorgungsalternativen der Machbarkeitsstudie Rheine_1 im morphologischen Kasten

Anh. 1: Liste der Gemeinden und (Land-) Kreise in der EUREGIO mit Bevölkerungszahlen und Klassifizierung sowie Zusammenfassung nach Gebiet. Nach (CBS 2019a; Destatis 2019; EUREGIO o. J., 2016b)

Nr.	Gemeinde/Stadt/Region	Anteil	Bevölkerung 31.12.2017	GK* (1-7)	Anmerkung
	EUREGIO	100,0 %	3.350.746		
	NEDERLAND	31,0 %	1.039.850		
	Regio Twente	18,7 %	627.848		
1	Gemeente Almelo		72.629	5	
2	Gemeente Borne		23.124	4	
3	Gemeente Dinkelland		26.291	4	
4	Gemeente Enschede		158.261	6	
5	Gemeente Haaksbergen		24.291	4	
6	Gemeente Hellendoorn		35.796	4	
7	Gemeente Hengelo		80.593	5	
8	Gemeente Oldenzaal		31.915	4	
9	Gemeente Twenterand		33.903	4	
10	Gemeente Wierden		24.258	4	
11	Gemeente Hof van Twente		34.930	4	
12	Gemeente Losser		22.547	4	
13	Gemeente Rijssen-Holten		38.097	4	
14	Gemeente Tubbergen		21.213	4	
	Regio Achterhoek	8,9 %	298.534		
15	Gemeente Aalten		26.962	4	
16	Gemeente Berkelland		44.032	4	
17	Gemeente Bronckhorst		36.352	4	
18	Gemeente Doetinchem		57.382	5	
19	Gemeente Montferland		35.627	4	
20	Gemeente Oost Gelre		29.672	4	
21	Gemeente Oude IJsselstreek		39.520	4	
22	Gemeente Winterswijk		28.987	4	
	Individueel deelnemende gemeenten				
23	Gemeente Coevorden		35.299	4	
24	Gemeente Hardenberg		60.539	5	
25	Gemeente Ommen		17.630	3	
	Waterschappen				
	Waterschap Rijn en IJssel (für ein Teilgebiet / voor een deelgebied)				
	Waterschap Vechtstromen (für ein Teilgebiet / voor een deelgebied)				
	DEUTSCHLAND	69,0 %	2.310.896		
26	Kreis Borken	11,0 %	369.718		
27	Stadt Ahaus		39.185	4	Stadt > 10.000

Nr.	Gemeinde/Stadt/Region	Anteil	Bevölkerung 31.12.2017	GK* (1-7)	Anmerkung
28	Stadt Bocholt		71.036	5	Stadt > 10.000
29	Stadt Borken		42.509	4	Stadt > 10.000
30	Stadt Gescher		17.253	3	Stadt > 10.000
31	Stadt Gronau		47.671	4	Stadt > 10.000
32	Gemeinde Heek		8.563	2	
33	Gemeinde Heiden		8.182	2	
34	Stadt Isselburg		10.713	3	Stadt > 10.000
35	Gemeinde Legden		7.295	2	
36	Gemeinde Raesfeld		11.350	3	Gemeinde > 10.000
37	Gemeinde Reken		14.670	3	Gemeinde > 10.000
38	Stadt Rhede		19.165	3	Stadt > 10.000
39	Gemeinde Schöppingen		7.066	2	
40	Stadt Stadtlohn		20.367	4	Stadt > 10.000
41	Gemeinde Südlohn		9.143	2	
42	Stadt Velen		12.989	3	Stadt > 10.000
43	Stadt Vreden		22.561	4	Stadt > 10.000
44	Kreis Coesfeld	6,5 %	219.360		
45	Gemeinde Ascheberg		15.283	3	Gemeinde > 10.000
46	Stadt Billerbeck		11.544	3	Stadt > 10.000
47	Stadt Coesfeld		36.302	4	Stadt > 10.000
48	Stadt Dülmen		46.507	4	Stadt > 10.000
49	Gemeinde Havixbeck		11.732	3	Gemeinde > 10.000
50	Stadt Lüdinghausen		24.550	4	Stadt > 10.000
51	Gemeinde Nordkirchen		9.941	2	
52	Gemeinde Nottuln		19.590	3	Gemeinde > 10.000
53	Stadt Olfen		12.674	3	Stadt > 10.000
54	Gemeinde Rosendahl		10.716	3	Gemeinde > 10.000
55	Gemeinde Senden		20.521	4	Gemeinde > 10.000
56	Stadt Münster		313.559	6	Stadt > 10.000
57	Kreis Steinfurt	13,3 %	446.565		
58	Gemeinde Altenberge		10.282	3	Gemeinde > 10.000
59	Stadt Emsdetten		36.151	4	Stadt > 10.000
60	Stadt Greven		37.502	4	Stadt > 10.000
61	Gemeinde Hopsten		7.600	2	
62	Stadt Horstmar		6.420	2	Stadt kleiner 10.000
63	Stadt Hörstel		20.093	4	Stadt > 10.000
64	Stadt Ibbenbüren		52.037	5	Stadt > 10.000
65	Gemeinde Ladbergen		6.591	2	
66	Gemeinde Laer		6.768	2	
67	Stadt Lengerich		22.626	4	Stadt > 10.000
68	Gemeinde Lienen		8.535	2	
69	Gemeinde Lotte		14.121	3	Gemeinde > 10.000

Nr.	Gemeinde/Stadt/Region	Anteil	Bevölkerung 31.12.2017	GK* (1-7)	Anmerkung
70	Gemeinde Metelen		6.375	2	
71	Gemeinde Mettingen		11.856	3	Gemeinde > 10.000
72	Gemeinde Neuenkirchen		13.856	3	Gemeinde > 10.000
73	Gemeinde Nordwalde		9.439	2	
74	Stadt Ochtrup		19.608	3	Stadt > 10.000
75	Gemeinde Recke		11.331	3	Gemeinde > 10.000
76	Stadt Rheine		76.018	5	Stadt > 10.000
77	Gemeinde Saerbeck		7.128	2	
78	Stadt Steinfurt		33.915	4	Stadt > 10.000
79	Stadt Tecklenburg		9.018	2	Stadt kleiner 10.000
80	Gemeinde Westerkappeln		11.155	3	Gemeinde > 10.000
81	Gemeinde Wettringen		8.140	2	
82	Kreis Warendorf	8,3 %	277.458		
83	Stadt Ahlen		52.530	5	Stadt > 10.000
84	Stadt Beckum		36.689	4	Stadt > 10.000
85	Gemeinde Beelen		6.245	2	
86	Stadt Drensteinfurt		15.532	3	Stadt > 10.000
87	Stadt Ennigerloh		19.841	3	Stadt > 10.000
88	Gemeinde Everswinkel		9.691	2	
89	Stadt Oelde		29.209	4	Stadt > 10.000
90	Gemeinde Ostbevern		10.926	3	Gemeinde > 10.000
91	Stadt Sassenberg		14.279	3	Stadt > 10.000
92	Stadt Sendenhorst		13.202	3	Stadt > 10.000
93	Stadt Telgte		19.716	3	Stadt > 10.000
94	Gemeinde Wadersloh		12.356	3	Gemeinde > 10.000
95	Stadt Warendorf		37.242	4	Stadt > 10.000
96	Landkreis Grafschaft Bentheim	4,1 %	135.859		
97	Stadt Bad Bentheim		15.418	3	Stadt > 10.000
98	<u>Samtgemeinde Emlichheim</u>		14.321	3	Gemeinde > 10.000
	Gemeinde Emlichheim	7.282			
	Gemeinde Hoogstede	2.871			
	Gemeinde Laar	2.115			
	Gemeinde Ringe	2.053			
99	<u>Samtgemeinde Neuenhaus</u>		13.912	3	Gemeinde > 10.000
	Gemeinde Esche	554			
	Gemeinde Georgsdorf	1.214			
	Gemeinde Lage	1.053			
	Stadt Neuenhaus	9.907			
	Gemeinde Osterwald	1.184			
100	Stadt Nordhorn		53.278	5	Stadt > 10.000
101	<u>Samtgemeinde Schüttorf</u>		15.540	3	Gemeinde > 10.000
	Gemeinde Engden	426			
	Gemeinde Isterberg	581			
	Gemeinde Ohne	595			
	Gemeinde Quendorf	569			

Nr.	Gemeinde/Stadt/Region	Anteil	Bevölkerung 31.12.2017	GK* (1-7)	Anmerkung
	Gemeinde Samern	752			
	Stadt Schüttorf	12.617			
102	<u>Samtgemeinde Uelsen</u>		11.224	3	Gemeinde > 10.000
	Gemeinde Getelo	522			
	Gemeinde Gölenkamp	585			
	Gemeinde Halle	666			
	Gemeinde Itterbeck	1.760			
	Gemeinde Uelsen	5.597			
	Gemeinde Wielen	522			
	Gemeinde Wilsum	1.572			
103	Gemeinde Wietmarschen		12.166	3	Gemeinde > 10.000
104	Stadt Osnabrück		164.374	6	Stadt > 10.000
105	Landkreis Osnabrück	10,5 %	352.556		
106	<u>Samtgemeinde Artland</u>		23.334	4	Gemeinde > 10.000
	Gemeinde Badbergen	4.564			
	Gemeinde Menslage	2.441			
	Gemeinde Nortrup	2.963			
	Stadt Quakenbrück	13.366			
107	Gemeinde Bad Essen		15.449	3	Gemeinde > 10.000
108	Stadt Bad Iburg		10.599	3	Stadt > 10.000
109	Gemeinde Bad Laer		9.264	2	
110	Gemeinde Bad Rothenfelde		8.220	2	
111	Gemeinde Belm		13.729	3	Gemeinde > 10.000
112	<u>Samtgemeinde Bersenbrück</u>		29.408	4	Gemeinde > 10.000
	Gemeinde Alfhausen	3.899			
	Gemeinde Ankum	7.536			
	Gemeinde Eggermühlen	1.734			
	Gemeinde Gehrde	2.539			
	Gemeinde Kettenkamp	1.765			
	Gemeinde Rieste	3.481			
	Stadt Bersenbrück	8.454			
113	Gemeinde Bissendorf		14.636	3	Gemeinde > 10.000
114	Gemeinde Bohmte		12.612	3	Gemeinde > 10.000
115	Stadt Bramsche		30.992	4	Stadt > 10.000
116	Stadt Dissen am Teutoburger Wald		9.689	2	Stadt kleiner 10.000
117	<u>Samtgemeinde Fürstenau</u>		15.949	3	Gemeinde > 10.000
	Gemeinde Berge	3.524			
	Gemeinde Bippen	2.980			
	Stadt Fürstenau	9.445			
118	Stadt Georgsmarienhütte		31.624	4	Stadt > 10.000
119	Gemeinde Glandorf		6.665	2	
120	Gemeinde Hagen am Teutoburger Wald		13.412	3	Gemeinde > 10.000
121	Gemeinde Hasbergen		10.944	3	Gemeinde > 10.000
122	Gemeinde Hilter am Teutoburger Wald		10.383	3	Gemeinde > 10.000
123	Stadt Melle		46.451	4	Stadt > 10.000
124	<u>Samtgemeinde Neuenkirchen</u>		6.587	2	
	Gemeinde Neuenkirchen	963			

<u>Nr.</u>	<u>Gemeinde/Stadt/Region</u>	<u>Anteil</u>	<u>Bevölkerung 31.12.2017</u>	<u>GK* (1-7)</u>	<u>Anmerkung</u>
	Gemeinde Merzen	3.907			
	Gemeinde Voltlage	1.717			
125	Gemeinde Ostercappeln		9.628	2	
126	Gemeinde Wallenhorst		22.981	4	Gemeinde > 10.000
	Landkreis Emsland	0,9 %	31.447		
127	Gemeinde Emsbüren		10.150	3	Gemeinde > 10.000
128	<u>Samtgemeinde Spelle</u>		13.582	3	Gemeinde > 10.000
	Gemeinde Lünne	1.905			
	Gemeinde Schapen	2.368			
	Gemeinde Spelle	9.309			
129	Gemeinde Salzbergen		7.715	2	

* GK: Gemeindekategorie nach folgender Einteilung anhand der Bevölkerungszahl:

Legende

<u>Einwohnerzahl</u>	<u>Gemeindekategorie (GK)</u>	<u>Kategorie nach BBSR**</u>
bis 5.000	1	Landgemeinde
5.000-10.000	2	Kleine Kleinstadt
10.000-20.000	3	Größere Kleinstadt
20.000-50.000	4	Kleine Mittelstadt
50.000-100.000	5	Große Mittelstadt
100.000-500.000	6	Kleinere Großstadt
über 500.000	7	große Großstadt

** (BBSR o. J.)

<u>Land</u>	<u>Region</u>	<u>Einwohner 31.12.2017</u>						
		<u>gesamt</u>	<u>über 100.000</u>	<u>50.000 - 100.000</u>	<u>20.000 - 50.000</u>	<u>10.000 - 20.000</u>	<u>5.000 - 10.000</u>	<u>< 5.000 Einwohner</u>
Niederlande	Regio Twente	627.848	158.261	153.222	316.365	0	0	0
Niederlande	Regio Achterhoek	298.534	0	57.382	241.152	0	0	0
Niederlande	Individueel deelnemende gemeenten	113.468	0	60.539	35.299	17.630	0	0
Deutschland	Kreis Borken	369.718	0	71.036	172.293	86.140	40.249	0
Deutschland	Kreis Coesfeld	219.360	0	0	127.880	81.539	9.941	0
Deutschland	Kreis Steinfurt	446.565	0	128.055	150.287	92.209	76.014	0
Deutschland	Kreis Warendorf	277.458	0	52.530	103.140	105.852	15.936	0
Deutschland	Landkreis Graf- schaft Bentheim	135.859	0	53.278	0	82.581	0	0
Deutschland	Landkreis Osnabrück	352.556	0	0	184.790	117.713	50.053	0
Deutschland	Landkreis Emsland	31.447	0	0	0	23.732	7.715	0
Deutschland	Kreisfreie Städte	477.933	477.933	0	0	0	0	0
Ergebnis	Gesamt	3.350.746	636.194	576.042	1.331.206	607.396	199.908	0
		100,0 %	19,0 %	17,2 %	39,7 %	18,1 %	6,0 %	0,0 %
Niederlande		1.039.850	158.261	271.143	592.816	17.630	0	0
		100,0 %	15,2 %	26,1 %	57,0 %	1,7 %	0,0 %	0,0 %
Deutschland		2.310.896	477.933	304.899	738.390	589.766	199.908	0
		100,0 %	20,7 %	13,2 %	32,0 %	25,5 %	8,7 %	0,0 %

Anh. 2: Anzahl der Wohngebäude in Deutschland nach Baualtersklasse und Gebäudekategorie (Stand Mai 2011) (IWU 2013)

Baualtersklasse		EFH	RH	MFH	GMH	Summe	Anteil
		Anzahl Gebäude (in 1.000)					
1	... 1859	330	148	54	0,6	533	3 %
2	1860 ... 1918	966	492	442	28,7	1.929	11 %
3	1919 ... 1948	1.131	710	388	7,4	2.236	12 %
4	1949 ... 1957	859	447	356	17,3	1.679	9 %
5	1958 ... 1968	1.509	633	586	34	2.762	15 %
6	1969 ... 1978	1.507	611	412	50,1	2.580	14 %
7	1979 ... 1983	704	335	146	15	1.200	7 %
8	1984 ... 1994	1.160	652	309	28,7	2.150	12 %
9	1995 ... 2001	1.035	619	244	20,9	1.919	11 %
10	2002 ... 2009	775	384	85	7,6	1.251	7 %
Summe		9.976	5.030	3.023	210	18.239	100 %
Anteil		55 %	28 %	17 %	1 %	100 %	

EFH: Einfamilienhaus; RH: Reihenhaus; MFH: Mehrfamilienhaus; GMH: großes Mehrfamilienhaus

Anh. 3: Anzahl der Wohnungen in Deutschland nach Baualtersklasse und Gebäudekategorie (Stand Mai 2011) (IWU 2013)

Baualtersklasse		EFH	RH	MFH	GMH	Summe	Anteil
		Anzahl Wohnungen (in 1.000)					
1	... 1859	399	181	214	11,1	806	2 %
2	1860 ... 1918	1.213	617	2.177	525,8	4.533	12 %
3	1919 ... 1948	1.389	840	1.911	126	4.265	11 %
4	1949 ... 1957	1.060	546	2.003	307,5	3.915	10 %
5	1958 ... 1968	1.948	749	3.348	817,7	6.863	17 %
6	1969 ... 1978	1.915	685	2.313	1366,3	6.279	16 %
7	1979 ... 1983	881	374	852	355,7	2.463	6 %
8	1984 ... 1994	1.397	722	1.826	605,3	4.550	12 %
9	1995 ... 2001	1.204	674	1.390	407,7	3.675	9 %
10	2002 ... 2009	858	409	461	151,4	1.880	5 %
Summe		12.263	5.796	16.495	4.674	39.228	100 %
Anteil		31 %	15 %	42 %	12 %	100 %	

EFH: Einfamilienhaus; RH: Reihenhause; MFH: Mehrfamilienhaus; GMH: großes Mehrfamilienhaus

Anh. 4: Wohnfläche in Deutschland nach Baualtersklasse und Gebäudekategorie (Stand Mai 2011) (IWU 2013)

Baualtersklasse		EFH	RH	MFH	GMH	Summe	Anteil
		Wohnfläche (Millionen m ²)					
1	... 1859	46	19	16	0,7	82	2 %
2	1860 ... 1918	135	62	163	35,8	396	11 %
3	1919 ... 1948	150	82	129	7,9	370	10 %
4	1949 ... 1957	116	52	125	17	309	9 %
5	1958 ... 1968	218	76	225	47,1	567	16 %
6	1969 ... 1978	233	79	169	86,7	569	16 %
7	1979 ... 1983	110	45	64	21,9	240	7 %
8	1984 ... 1994	178	85	133	34,8	431	12 %
9	1995 ... 2001	158	80	104	25,5	368	10 %
10	2002 ... 2009	119	52	39	10,4	220	6 %
Summe		1.463	633	1.168	288	3.552	100 %
Anteil		41 %	18 %	33 %	8 %	100 %	

EFH: Einfamilienhaus; RH: Reihenhaus; MFH: Mehrfamilienhaus; GMH: großes Mehrfamilienhaus

Anh. 5: Verknüpfung von Wohnfläche des Gebäudebestands und flächenbezogenem Energiebedarf des Gebäudebestands in Deutschland

Zeitraum	Wohnfläche Gebäudebestand ¹		Zeitraum	durchschnittl. flächenbez. Endenergiebedarf ²	
	Mio. m ²	%		Stand 2014	Potenzial 2050
-			-	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)
bis 1919	478	13,5 %	bis 1919	169	127
1919-1948	370	10,4 %	1919-1948	187	94
1949-1978	1.445	40,7 %	1949-1978	208	73
1979-1994	671	18,9 %	1979-1995	146	66
1995-2001	368	10,4 %	1996-2002	102	71
2002-2009	220	6,2 %	2003-2009	71	57
Summe	3.552	100,0 %			

Zeitraum	resultierender jährlicher Endenergiebedarf				Einsparung ggü. 2011/2014	
	Stand 2011/2014		Potenzial 2050			
-	TWh/a	%	TWh/a	%	TWh/a	%
bis 1919	80,8	13,4 %	60,7	21,4 %	20,1	25 %
1919-1948	69,2	11,5 %	34,8	12,2 %	34,4	50 %
1949-1978	300,6	50,0 %	105,5	37,2 %	195,1	65 %
1979-1994/95	98,0	16,3 %	44,3	15,6 %	53,7	55 %
1995/96-2002/03	37,5	6,2 %	26,1	9,2 %	11,4	30 %
2002/03-2009	15,6	2,6 %	12,5	4,4 %	3,1	20 %
Summe	602	100,0 %	284	100,0 %	318	53 %

1: nach (IWU 2015)

2: nach (BMWi 2014)

Anh. 6: Anzahl und Prozentsatz der Machbarkeitsstudien aus WiEfm, die die entsprechende Technik in der ersten Spalte zur Wärmeversorgung mitbetrachtet hat.

Anzahl	alle Studien 31		deutsche Studien 12		niederländische Studien 19	
	Anteil	Anzahl	Anteil	Anzahl	Anteil	Anzahl
fossil	45 %	14	92 %	11	16 %	3
Erdgas-BHKW	26 %	8	67 %	8	0 %	0
Flüssiggas-BHKW	3 %	1	8 %	1	0 %	0
Erdgas(-Brennwert)-Kessel/Spitzenlast	35 %	11	67 %	8	16 %	3
Erdöl-Spitzenlast-Kessel	3 %	1	8 %	1	0 %	0
Abwärme	45 %	14	33 %	4	53 %	10
Abwärme Industrieprozesse	19 %	6	8 %	1	26 %	5
Abwärme Biogasanlagen	10 %	3	17 %	2	5 %	1
Abwärme Gewerbe	6 %	2	8 %	1	5 %	1
Abwärme Kläranlage	16 %	5	17 %	2	16 %	3
Wärmerückgewinnung Abwasser, Riothermie	13 %	4	8 %	1	16 %	3
Biomasse/-gas	58 %	18	92 %	11	37 %	7
Biogas/Biomethan-BHKW	13 %	4	25 %	3	5 %	1
Biogas/Biomethan(-Brennwert)-Kessel	13 %	4	8 %	1	16 %	3
Pflanzenöl-BHKW	3 %	1	8 %	1	0 %	0
Holz hackschnitzel-Kessel	32 %	10	58 %	7	16 %	3
Holzpellet-Kessel	32 %	10	50 %	6	21 %	4
Holz-Vergaser	6 %	2	8 %	1	5 %	1
Power-to-Heat	45 %	14	33 %	4	53 %	10
Luft-Wasser-Wärmepumpe	13 %	4	17 %	2	11 %	2
Wasser-Wasser-Wärmepumpe	10 %	3	8 %	1	11 %	2
dezentrale Wärmepumpen	35 %	11	33 %	4	37 %	7
zentrale Groß-Wärmepumpe	19 %	6	0 %	0	32 %	6
Heizstab/Durchlauferhitzer/Elektrokessel	10 %	3	0 %	0	16 %	3
Oberflächengewässer	16 %	5	0 %	0	26 %	5
direkte (freie) Kühlung	3 %	1	0 %	0	5 %	1
Wärme mit Wärmepumpe	16 %	5	0 %	0	26 %	5
Geothermie	23 %	7	17 %	2	26 %	5
Erdwärmesonden	16 %	5	17 %	2	16 %	3
Erdwärmekollektoren	16 %	5	17 %	2	16 %	3
oberflächennahe Geothermie	6 %	2	0 %	0	11 %	2
Tiefe Geothermie	6 %	2	0 %	0	11 %	2
Solar	35 %	11	58 %	7	21 %	4
Solarthermie	35 %	11	58 %	7	21 %	4
Photovoltaik	16 %	5	25 %	3	11 %	2
Netz	65 %	20	83 %	10	53 %	10
Wärmenetz allgemein	58 %	18	83 %	10	42 %	8
Kaltes Wärmenetz	10 %	3	8 %	1	11 %	2
Niedertemperaturnetz	10 %	3	0 %	0	16 %	3
Nahwärmenetz (Höchsttemperatur 90-120 °C)	6 %	2	0 %	0	11 %	2
Nahwärmenetz (Hochtemperatur 70 °C)	6 %	2	0 %	0	11 %	2
Nahwärmenetz (Mitteltemperatur 50 °C)	6 %	2	0 %	0	11 %	2
Speicher	55 %	17	50 %	6	58 %	11
Pufferspeicher	35 %	11	50 %	6	26 %	5
WKO/Aquiferspeicher	23 %	7	0 %	0	37 %	7
Saisonalspeicher/Erdbodenwärmespeicher	13 %	4	17 %	2	11 %	2
intermittierende Speicherbeladung	3 %	1	8 %	1	0 %	0

BHKW: Blockheizkraftwerk

WKO: Warmte Koude Opslag (Niederländisch für Wärme-Kälte-Speicherung; bezeichnet einen Aquiferspeicher)

nach (Bode 2018; Tauw 2018; Liandon 2019; Tauw 2017; DFIC 2017; energienetk 2018a, 2018b; FH Münster o. J.; IF Technology 2017; Gertec 2017; HMAP BV 2017; Seeger 2018; iNeG 2017a, 2017b, 2018; Syntraal 2019; pbr NETZenergie 2019; ZEBRA B.V. 2018; EA Lippe 2017; kiEMT 2019a; Sweco 2018; Ekwadmaat BV 2019; CCS 2019; Over Morgen 2019; Warmte.nu 2018; Energethik 2017)

Anh. 7: Auswertung der deutschen und niederländischen Machbarkeitsstudien des WiEfm-Projekts bezüglich nachhaltiger Wärmeversorgungslösungen

Nr.	Land	Studie / Szenario	Versorgung			unterstützt durch/kombinierbar mit (Spitzenlast etc.)					Netz & Temperaturniveau		zur Versorgung von	
			Hauptkomponente 1	Hauptkomponente 2	Hauptkomponente 3	Erzeuger	Erzeuger 2	Speicher	Speicher 2	Anmerkung	Netz	Temperaturniveau	zur Versorgung von	Anmerkung
1	DE	Greven_1-V01	Biogas/-methan-BHKW (BGA) - Überschuss-Wärme/Wärmeinkauf	Solarthermie-Anlage (zentral)				saisonalen Erdbecken-Langzeitspeicher	Pufferspeicher	(500 m³)	Nahwärmenetz (klassisch)	ø 70 °C	Bestand Wohngebäude	und Bestand Nichtwohngebäude (öffentliche Gebäude)
2	DE	Senden_1-V01	Holzhackschnitzel-Kessel			Biomethan-Kessel			Pufferspeicher	ggf. intermittierend beladen	Nahwärmenetz (klassisch)	80 °C / 60 °C VL (40 °C RL)	Bestand Nichtwohngebäude	Schulen
3	DE	Senden_1-V02	Biomethan-BHKW (ohne BGA)	Biomethan-Brennwert-Kessel		Biomethan-Kessel			Pufferspeicher	ggf. intermittierend beladen	Nahwärmenetz (klassisch)	80 °C / 60 °C VL (40 °C RL)	Bestand Nichtwohngebäude	Schulen
4	DE	Schöppingen_1-V01	Biogas/-methan-BHKW (BGA) - Überschuss-Wärme/Wärmeinkauf			Spitzenlast- und Reserve-Kessel					Nahwärmenetz (klassisch)	mind. 70 °C VL	Neubaubereich Wohngebäude	sowie Produktionsbetrieb
5	DE	Schöppingen_1-V02	Biomethan-BHKW (ohne BGA)			Spitzenlast- und Reserve-Kessel					Nahwärmenetz (klassisch)	mind. 70 °C VL	Neubaubereich Wohngebäude	sowie Produktionsbetrieb
6	DE	Coesfeld_1-V01	Pflanzenöl-BHKW	(Pflanzenöl o. ä. aus Altfettaufbereitung/-Verwertung)							dezentrale Einzelversorgung		Industrie- / Produktionsbetrieb	
7	DE	Coesfeld_1-V02	Holzhackschnitzel-Kessel	(mit HHS aus städtischem Grünschnitt)							dezentrale Einzelversorgung		Großverbraucher Industriebetrieb	
8	DE	Coesfeld_1-V03	Biogas/-methan-BHKW (BGA) - Überschuss-Wärme/Wärmeinkauf	Erdgas-BHKW (bilanzielles Biomethan möglich)		Spitzenlast- und Reserve-Kessel	Erdgas-Gebläse-brenner				Nahwärmenetz (klassisch)		Industrie- / Produktionsbetrieb	(bis zu 10)
9	DE	Coesfeld_1-V04	Holzhackschnitzel-Kessel	(mit HHS aus städtischem Grünschnitt)	Biogas/-methan-BHKW (BGA) – Überschuss-Wärme/Wärmeinkauf	Spitzenlast- und Reserve-Kessel					Nahwärmenetz (klassisch)		Industrie- / Produktionsbetrieb	(bis zu 10)
10	DE	Coesfeld_2-V01	Biomassekessel für Holzspäne und -Stäube	(Einblasfeuerung Muffel + Rostfeuerung)		Solarthermie-Anlage	ORC-Anlage		Pufferspeicher		Wärmeleitungen Thermoöl und Warmwasser	Thermoöl 260 °C, Warmwasser 100 °C	Industrie- / Produktionsbetrieb	(Prozesswärme & Heizungswärme)
11	DE	Borken_1-V01	Biogas/-methan-BHKW (BGA) – Überschuss-Wärme/Wärmeinkauf			Spitzenlast- und Reserve-Kessel			Pufferspeicher		Nahwärmenetz (klassisch)		Neubaubereich Wohngebäude	
12	DE	Borken_1-V02	Holzvergaser-BHKW	Holzhackschnitzel-Kessel					Pufferspeicher		Nahwärmenetz (klassisch)		Neubaubereich Wohngebäude	

Nr.	Land	Studie / Szenario	Versorgung			unterstützt durch/kombinierbar mit (Spitzenlast etc.)					Netz & Temperaturniveau		zur Versorgung von	
			Hauptkomponente 1	Hauptkomponente 2	Hauptkomponente 3	Erzeuger	Erzeuger 2	Speicher	Speicher 2	Anmerkung	Netz	Temperaturniveau	zur Versorgung von	Anmerkung
13	DE	Borken_1-V03	Erdsonden-Feld (zentral)	dezentrale Wärmepumpen (Wasser-Wasser oder Sole/Wasser) in allen Gebäuden					Dezentrale Pufferspeicher		kaltes Nahwärmenetz		Neubaugbiet Wohngebäude	(Heizen und Kühlen)
14	DE	Ibbenbüren_1-V01	Solarthermie-Anlage (zentral)	Holzvergaser-BHKW	Biomassekessel (mit Laub- und Grünschnitt-Briketts, HHS)	Spitzenlast- und Reserve-Kessel	Brikettierungs- und Trocknungsanlage mit BHKW	saisonalen Erdbecken-Langzeitspeicher	dezentrale Pufferspeicher		Nahwärmenetz (klassisch)	80 °C VL (60 °C RL)	Bestand Nichtwohngebäude	(öffentlich) + ggf. Bestand Wohngebäude + ggf. Schwimmbad
15	DE	Ladbergen_1-V01	Biogas/-methan-BHKW (BGA) - Überschuss-Wärme/Wärmeinkauf								Nahwärmenetz (klassisch)		Bestand Nichtwohngebäude	(kommunal, kirchlich, betrieblich)
16	DE	Ladbergen_1-V02	Holzpellet-Kessel	Erdgas-BHKW (bilanzielles Biomethan möglich)		Spitzenlast- und Reserve-Kessel			Pufferspeicher		Nahwärmenetz (klassisch)		Bestand Nichtwohngebäude	(+ 10 weitere Gebäude)
17	DE	Ladbergen_1-V03	Abwärme Gewerbe	(nicht näher spezifiziert)		Spitzenlast- und Reserve-Kessel			Pufferspeicher		Nahwärmenetz (klassisch)		Bestand Gewerbe	
18	DE	Rheine_1-V01	Holzpellet-Kessel						Pufferspeicher		Nahwärmenetz (klassisch)		Neubaugbiet Wohngebäude	(Mehrfamilienhäuser + Stadtvillen)
19	DE	Rheine_1-V02	zentrale (Groß-)Wärmepumpe	Erdsonden-Feld (zentral)		Solarthermie-Anlage	elektrische Warmwasser-Nachheizung		Pufferspeicher		Niedertemperatur-Wärmenetz	45 °C VL	Neubaugbiet Wohngebäude	(Einfamilienhäuser + Reihenhäuser)
20	DE	Rheine_1-V03	Erdsonden-Feld (zentral)	Erdwärmekollektorfeld	dezentrale Wärmepumpen (Wasser-Wasser oder Sole/Wasser) in allen Gebäuden	ggf. Solarthermie-Anlage	ggf. PV-Anlage		Pufferspeicher		kaltes Nahwärmenetz		Neubaugbiet Wohngebäude	(Einfamilienhäuser)
21	DE	Rheine_1-V04	dezentrale Wärmepumpe (Luft-Wasser)			ggf. PV-Anlage			Pufferspeicher		dezentrale Einzelversorgung		Neubaugbiet Wohngebäude	(Einfamilienhäuser + Reihenhäuser + Mehrfamilienhäuser)
22	DE	Rheine_1-V05	dezentrale Erdsonden-Wärmepumpen (Sole/Wasser-Wasser)			ggf. PV-Anlage			Pufferspeicher		dezentrale Einzelversorgung		Neubaugbiet Wohngebäude	(Einfamilienhäuser + Reihenhäuser + Mehrfamilienhäuser)

Nr.	Land	Studie / Szenario	Versorgung			unterstützt durch/kombinierbar mit (Spitzenlast etc.)					Netz & Temperaturniveau		zur Versorgung von				
			Hauptkomponente 1	Hauptkomponente 2	Hauptkomponente 3	Erzeuger	Erzeuger 2	Speicher	Speicher 2	Anmerkung	Netz	Temperaturniveau	zur Versorgung von	Anmerkung			
23	DE	Rheine_1-V06	Holzpellet-Kessel									dezentrale Einzelversorgung		Neubaugelbiet Wohngebäude	(Einfamilienhäuser + Reihenhäuser + Mehrfamilienhäuser)		
24	DE	Warendorf_1-V01	dezentrale Wärmepumpe (Luft-Wasser)			ggf. PV-Anlage						Pufferspeicher		dezentrale Einzelversorgung		Neubaugelbiet Wohngebäude	(Versorgung Einfamilienhäuser + Reihenhäuser + Mehrfamilienhäuser - 80 WE)
25	DE	Warendorf_1-V02	dezentrale Erdsonden-Wärmepumpen (Sole/Wasser-Wasser)			ggf. PV-Anlage						Pufferspeicher		dezentrale Einzelversorgung		Neubaugelbiet Wohngebäude	(Versorgung Einfamilienhäuser + Reihenhäuser + Mehrfamilienhäuser - 80 WE)
26	DE	Warendorf_1-V03	Holzpellet-Kessel											dezentrale Einzelversorgung		Neubaugelbiet Wohngebäude	(Versorgung Einfamilienhäuser + Reihenhäuser + Mehrfamilienhäuser - 80 WE)
27	DE	Warendorf_1-V04	Holzpellet-Kessel			ggf. Solarthermie-Anlage (zentral)						Pufferspeicher		Nahwärmenetz (klassisch)		Neubaugelbiet Wohngebäude	
28	DE	Warendorf_1-V05	Holz hackschnitzel-Kessel	Erdgas-BHKW (bilanzielles Biomethan möglich)		ggf. Solarthermie-Anlage (zentral)						Pufferspeicher		Nahwärmenetz (klassisch)		Neubaugelbiet Wohngebäude	
29	DE	Warendorf_2-V01	Holz hackschnitzel-Kessel	Holz hackschnitzel-Kessel								Pufferspeicher		Nahwärmenetz (klassisch)		Neubaugelbiet Wohngebäude	
30	DE	Warendorf_3-V01	Holz hackschnitzel-Kessel			Spitzenlast- und Reserve-Kessel	ggf. Solarthermie-Anlage							Nahwärmenetz (klassisch)		Bestand Wohngebäude	(+ Hofestellen (7 Abnehmer))
31	DE	Warendorf_3-V02	Biogas/-methan-BHKW (BGA) - Überschuss-Wärme/Wärmeeinkauf			Spitzenlast- und Reserve-Kessel								Nahwärmenetz (klassisch)		Bestand Wohngebäude	(+ Hofestellen (7 Abnehmer) + Bestand Wohngebiet 13-43 Abnehmer)
32	NL	Apeldoorn_1-V01	Klärgas-BHKW(Kläranlage, Restwärme)	Abwasser-Wärmepumpe (Kläranlage, zentral)		Spitzenlast- und Reserve-Kessel	Biomasse-Kessel (Holz)							Nahwärmenetz (klassisch)	70 °C	Bestand Wohngebäude	
33	NL	Beuningen_1-V01	PV-Module mit thermischen Verstärkern (Wärmetauschern)	zentrale (Groß-)Wärmepumpe				ggf. WKO (Aquiferspeicher)				Pufferspeicher		dezentrale Einzelversorgung	70 °C (bei Dämmung /Tausch Heizkörper auch niedriger)	Bestand Bürogebäude	

Nr.	Land	Studie / Szenario	Versorgung			unterstützt durch/kombinierbar mit (Spitzenlast etc.)					Netz & Temperaturniveau		zur Versorgung von			
			Hauptkomponente 1	Hauptkomponente 2	Hauptkomponente 3	Erzeuger	Erzeuger 2	Speicher	Speicher 2	Anmerkung	Netz	Temperaturniveau	zur Versorgung von	Anmerkung		
34	NL	Culemborg_1-V01	Abwasser-Wärmepumpe (Kläranlage, zentral)			ggf. Elektro- oder Bio-Kessel zur Nacherhitzung					Pufferspeicher		Mitteltemperatur-Wärmenetz	60 °C VL/40 °C RL	Bestand Nichtwohngebäude	(4 Schulgebäude, 1 Schwimmbad, 1 Moschee, 1 Gewerkschaftsgebäude)
35	NL	Doetichem_1-V01	Wärmetauscher (Oberflächenwasser)	Wärmepumpe(n) (zentral oder dezentral)	Wehre und Pumpstationen als unterstützende Infrastruktur								ggf. mit Wärmenetz		Prinzip	(Gebäudebeheizung mit WKO)
36	NL	Doetichem_1-V02	Wärmetauscher	Tiefe Wasserschichten (unter 18 m, 4-8 °C) zur Kühlung		ggf. Wärmepumpen							ggf. mit Kältenetz		Prinzip	(Abnehmer mit Kältenachfrage)
37	NL	Ermelo_1-V01	Holzhackschnitzel-Kessel	(städtischer Grünschnitt)									Hochtemperatur-Wärmenetz	90 - 70 °C	Neubau Nichtwohngebäude	(Schwimmbad + Sportzentrum + Wohnungen Bestand Mehrfamilienhäuser)
38	NL	Ermelo_1-V02	Riothermie (Abwasserkanal-Wärmetauscher)	dezentrale Wärmepumpen (Wasser-Wasser oder Sole/Wasser) in allen Gebäuden		Wärmepumpen (Luft-Wasser) als Reserve	elektrische Warmwasser-Nachheizung						kaltes Nahwärmenetz		Neubau Nichtwohngebäude	(Schwimmbad + Sportzentrum + Wohnungen Bestand Mehrfamilienhäuser)
39	NL	Ermelo_1-V03	Solarthermie-Anlage (zentral)	dezentrale Wärmepumpen (Wasser-Wasser oder Sole/Wasser) in allen Gebäuden		Wärmepumpen (Luft-Wasser) als Reserve							kaltes Nahwärmenetz		Neubau Nichtwohngebäude	(Schwimmbad)
40	NL	Hengelo_1-V01	Geothermie-Brunnen	zentrale (Groß-)Wärmepumpe									Niedertemperatur-Wärmenetz	40 °C	Bestand Wohngebäude	
41	NL	Hengelo_1-V02	zentrale (Groß-)Wärmepumpe	(Wasser/Sole-Wasser für WKO)									Niedertemperatur-Wärmenetz	40 °C	Bestand Wohngebäude	
42	NL	Hengelo_1-V03	zentrale (Groß-)Wärmepumpe	Wärmetauscher (Oberflächenwasser)									Niedertemperatur-Wärmenetz	40 °C	Bestand Wohngebäude	
43	NL	Hengelo_1-V04	zentrale (Groß-)Wärmepumpe	Solarthermie-Anlage (zentral)									Niedertemperatur-Wärmenetz	40 °C	Bestand Wohngebäude	
44	NL	Hengelo_1-V05	Restwärme (Industrie)										Niedertemperatur-Wärmenetz	40 °C	Bestand Wohngebäude	
45	NL	Kesteren_1-V01	Solarthermie-Anlage (zentral)	PV-Anlage		Elektro-Kessel	Klimaanlage	PCM-Speicher					Wärmenetz		Bestand Gewerbe	
46	NL	Kesteren_1-V02	Absorptions-Wärmepumpe	(mit Dampf aus Fabrik, Abwärme)	PV-Anlage	Elektro-Kessel	Klimaanlage						Wärmenetz		Bestand Gewerbe	

Nr.	Land	Studie / Szenario	Versorgung			unterstützt durch/kombinierbar mit (Spitzenlast etc.)					Netz & Temperaturniveau		zur Versorgung von	
			Hauptkomponente 1	Hauptkomponente 2	Hauptkomponente 3	Erzeuger	Erzeuger 2	Speicher	Speicher 2	Anmerkung	Netz	Temperaturniveau	zur Versorgung von	Anmerkung
47	NL	Putten_1-V01	Riothermie (Abwasserkanal-Wärmetauscher)	dezentrale Wärmepumpen (Wasser-Wasser oder Sole/Wasser) in allen Gebäuden		ggf. PV-Anlage			dezentrale Pufferspeicher		kaltes Nahwärmenetz		Neubaubereich Wohngebäude	
48	NL	Putten_1-V02	Riothermie (Abwasserkanal-Wärmetauscher)	Teilzentrale (Groß-)Wärmepumpen	(pro Häuserblock < 10 Häuser)	ggf. PV-Anlage			Pufferspeicher		kaltes Nahwärmenetz (Hauptnetz) + klassisches Nahwärmenetz (Verteilung)		Neubaubereich Wohngebäude	
49	NL	Putten_1-V03	Riothermie (Abwasserkanal-Wärmetauscher)	zentrale (Groß-)Wärmepumpe		Spitzenlast- und Reserve-Kessel	ggf. PV-Anlage				Mitteltemperatur-Wärmenetz (Heizung) + klassisches Wärmenetz (Warmwasser)		Neubaubereich Wohngebäude	
50	NL	Putten_1-V04	dezentrale Erdsonden-Wärmepumpen (Sole/Wasser-Wasser)			ggf. PV-Anlage					dezentrale Einzelversorgung		Neubaubereich Wohngebäude	
51	NL	Wageningen_1-V01	Wärmetauscher (Oberflächenwasser)	dezentrale Wärmepumpen (Wasser-Wasser oder Sole/Wasser) in allen Gebäuden		elektrische Warmwasser-Nachheizung		WKO (Aquiferspeicher)	dezentrale Pufferspeicher		kaltes Nahwärmenetz	12 °C	Bestand Wohngebäude	(Doppelhaushälften und Reihenhäuser, 448 Häuser)
52	NL	Wageningen_1-V02	Wärmetauscher (Oberflächenwasser)	zentrale (Groß-)Wärmepumpe		elektrische Warmwasser-Nachheizung		WKO (Aquiferspeicher)	dezentrale Pufferspeicher		Mitteltemperatur-Wärmenetz	50 °C	Bestand Wohngebäude	(Doppelhaushälften und Reihenhäuser, 448 Häuser)
53	NL	Wageningen_1-V03	Außenluft-Wärme für WKO	zentrale (Groß-)Wärmepumpe		elektrische Warmwasser-Nachheizung		WKO (Aquiferspeicher)	dezentrale Pufferspeicher		Mitteltemperatur-Wärmenetz	50 °C	Bestand Wohngebäude	(Doppelhaushälften und Reihenhäuser, 448 Häuser)
54	NL	Wageningen_1-V04	Außenluft-Wärme für WKO	zentrale (Groß-)Wärmepumpe		elektrische Warmwasser-Nachheizung		Langzeit-Wärmespeicher (Ecovat)	dezentrale Pufferspeicher		Mitteltemperatur-Wärmenetz	50 °C	Bestand Wohngebäude	(Doppelhaushälften und Reihenhäuser, 448 Häuser)
55	NL	Wageningen_1-V05	Zentrale Außenluft-Wärmepumpen			elektrische Warmwasser-Nachheizung			dezentrale Pufferspeicher		Mitteltemperatur-Wärmenetz	50 °C	Bestand Wohngebäude	(Doppelhaushälften und Reihenhäuser, 448 Häuser)
56	NL	Wageningen_1-V06	Außenluft-Wärme für WKO	zentrale (Groß-)Wärmepumpe		elektrische Warmwasser-Nachheizung		WKO (Aquiferspeicher)	dezentrale Pufferspeicher		Nahwärmenetz (klassisch)	70 °C	Bestand Wohngebäude	(Doppelhaushälften und Reihenhäuser, 448 Häuser)
57	NL	Wezep_1-V01	Wärmetauscher (Abwasserbecken, Fabrikabwasser)	zentrale (Groß-)Wärmepumpe				Abwasser-Pufferbecken			dezentrale Einzelversorgung	55 °C	Bestand Nichtwohngebäude	(Schwimmbad)

Anh. 8: Bewertungskriterien für Energieversorgungssysteme nach Reich u. Reppich
(2018, S. 31–32)

Technische...	Energetische...	Ökonomische...	Ökologische...	Weitere...
... Bewertungskriterien				
Anlagenleistung	Wirkungsgrad	Energetische Amortisationsdauer	Emissionen	Mengenmäßige Verfügbarkeit der Primärenergie unter Berücksichtigung geographischer und zeitlicher Aspekte
Betriebsstundenzahl	Nutzungsgrad	Gesamtkosten	Sonstige Umwelteffekte	
Volllaststundenzahl	Energieerntefaktor	Kosten der bereitgestellten Sekundärenergie		
Technische Lebensdauer	Globalwirkungsgrad			Potenziale, Entwicklungsperspektiven

Anh. 9: Übersicht über die Nachhaltigkeitsindikatoren der multikriteriellen Entscheidungsanalyse von Zech. (Zech 2015, S. 40)

Ökologische Dimension		Ökonomische Dimension		Soziale Dimension	
Lfd. Nr.	Indikator	Lfd. Nr.	Indikator	Lfd. Nr.	Indikator
1	Treibhauspotenzial (CO ₂ -Äquivalente)	8	Kapitalgebundene Kosten	12	Anteil der Wärmeenergiekosten am Haushaltseinkommen
2	Versauerungspotenzial (SO ₂ -Äquivalente)	9	Laufende Kosten	13	Konfliktpotenzial
3	Ozonbildungspotenzial (TOPP-Äquivalente)	10	Versorgungssicherheit (allgemein)	14	Nutzungskonkurrenz
4	Feinstaub (direkt)	11	Entwicklung und Volatilität der Brennstoffpreise	15	Lokale Belastung der Anwohner in direkter Umgebung einer Wärmetechnologie
5	Kumulierter Stoff-Aufwand			16	Unfall-/ Gesundheitsrisiken
6	Recyclingfähigkeit der Anlage			17	Gesellschaftlicher Nutzen
7	Reichweite des Energieträgers				

Anh. 10: Übersicht über Schadenskategorien und zugehörige Emissionen von Zech. (Zech 2015, S. 80)

Schadenskategorie	Berücksichtigte Luftschadstoffe
Menschliche Gesundheit	Ammoniak (NH ₃), flüchtige organische Verbindungen (NMVOC), Stickoxide (NO _x), und Feinstaub (PM _{2,5} und PM _{coarse}) sowie Schwefeldioxid (SO ₂)
Verlust an Biodiversität	NH ₃ , NMVOC, NO _x sowie SO ₂
Wirkung von Luftschadstoffen auf Agrarprodukte	NH ₃ , NMVOC, NO _x sowie SO ₂
Materialschäden durch Luftschadstoffe	NO _x sowie SO ₂
Schadenswirkung durch Treibhausgasemissionen	CH ₄ , CO ₂ sowie N ₂ O

Anh. 11: Faktoren zur Charakterisierung von Wärmenetzen nach Saxion (2019)

Temperaturen Wärmenetz	
Vorlauftemperatur	
Rücklauftemperatur	
Größe des Wärmenetzes	
Leistung[MW]	
Anzahl der Anschlüsse	
Wärme	
Energiequelle	Restwärme/Biogas/etc.
Anlagenkomponenten	Wärmepumpe, Pufferspeicher, Gaskessel, Holzpelletofen, Biomasseheizkraftwerk, etc.
Energiebilanz	
Gesamtenergie [GJ/Jahr]	
nachhaltig [GJ/Jahr]/(%)	
Wärmepumpe (Strom aus dem Netz) [GJ/Jahr]/(%)	
fossil [GJ/Jahr]/(%)	
geliefert (GJ/Jahr)	
Eigenschaften Versorgungsgebiet	
Art der Gebäude und Baujahr	
Art des Gebiets	Block, Bezirk, Stadt, Region
Netz-Eigenschaften	
Rohrlänge [m]	
Nachhaltigkeit	
Primary Energy Ratio (PER)* [-]	
CO ₂ -Index [-]	
Netzverluste [%]	
Wärmeintensitätsnetz	
Wärmeliniendichte** [MWh/(m · a)] oder[GJ/(m · a)]	

* das Primärenergieverhältnis (PER von engl. *Primary Energy Ratio*) ist die dem Abnehmer zugeführte Wärmemenge geteilt durch den Einsatz fossiler Brennstoffe und kann für die Bestimmung der Nachhaltigkeit herangezogen werden (Saxion 2019). Der Kehrwert des PER ist der Primärenergiefaktor

** Die Effekte der Umgebung von Wärmenetzen, nämlich die Bebauungsdichte, die Wärmedichte und der Energieverbrauch der Gebäude, sind im Parameter Wärmeliniendichte enthalten.

Um die Wärmeverluste und Pumpenverluste der Netze zu bestimmen, sind die Parameter Rohrleitungsdurchmesser, Art der Dämmung und Leitungslänge wichtig. In der Praxis sind jedoch Durchmesser und Dämmung schwierig zu erfassen, da verschiedene Durchmesser und Dämmstärken in einem Netz vorkommen.

Anh. 12: Darstellung der sechs Wärmeversorgungsalternativen der Machbarkeitsstudie Rheine_1 im morphologischen Kasten

