



Potenzialstudie Kraft-Wärme-Kopplung

LANUV-Fachbericht 116

Potenzialstudie Kraft-Wärme-Kopplung

LANUV-Fachbericht 116

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
Recklinghausen 2021

IMPRESSUM

Herausgeber	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) Leibnizstraße 10, 45659 Recklinghausen Telefon 02361 305-0 Telefax 02361 305-3215 E-Mail: poststelle@lanuv.nrw.de
Bearbeitung	Dr. Bernd Eikmeier (†), Karen Janßen, Johannes Hayek, Felix Horch, Hannes Kuhlmann, Dr. Lena Vorspel (Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM), Annalena Warburg, Jaro Blanke, Ole Nienaber, Prof. Dr. Eckhard Ritterbach, Dr. Philipp Vinnemeier, Dr. Tammo Wenterodt (Ramboll Deutschland GmbH), Dietmar Schüwer, Clemens Schneider, Thomas Hanke, Simon Heck, Frank Merten, Sascha Samadi (Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH)
Fachredaktion	Nils Dering, Antje Kruse, Klaus Vogel
Kartengrundlage	Sofern nicht anders angegeben: Land NRW (2021): Datenlizenz Deutschland – Zero (https://www.govdata.de/dl-de/zero-2-0)
Titelbild	© AdobeStock_focus_finder
Stand	September 2021
ISSN	1864-3930 (Print), 2197-7690 (Internet), LANUV-Fachbericht
Informationsdienste	Informationen und Daten aus NRW zu Natur, Umwelt und Verbraucherschutz unter • www.lanuv.nrw.de Aktuelle Luftqualitätswerte zusätzlich im • WDR-Videotext
Bereitschaftsdienst	Nachrichtenbereitschaftszentrale des LANUV (24-Std.-Dienst) Telefon 0201 714488

Nachdruck – auch auszugsweise – ist nur unter Quellenangaben und Überlassung von Belegexemplaren nach vorheriger Zustimmung des Herausgebers gestattet. Die Verwendung für Werbezwecke ist grundsätzlich untersagt.

Vorwort

Sehr geehrte Leserin, sehr geehrter Leser,

das Jahr 2020 war in Nordrhein-Westfalen mit einer durchschnittlichen Jahrestemperatur von 11,1 Grad Celsius das wärmste seit Beginn der Wetteraufzeichnungen, Nordrhein-Westfalen erlebte das dritte viel zu trockene Jahr in Folge und gleichzeitig wird deutlich, dass immer mehr Starkregen fällt. Die Trends sind eindeutig, der gegenwärtige Klimawandel ist eine Tatsache und menschliches Handeln der Hauptgrund dafür.

Das wichtigste Instrument, um den Klimawandel zu verlangsamen und die Klimafolgen zu reduzieren, ist ein aktiver Klimaschutz, so dass das anvisierte 1,5-Grad-Celsius-Ziel erreicht werden kann. Aus diesem Grund hat auch das Land NRW die Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 als klares Ziel ausgegeben.

Da in Nordrhein-Westfalen mehr als die Hälfte des Endenergieverbrauchs auf den Wärmebereich entfällt, nimmt dieser Sektor eine Schlüsselrolle bei der Erreichung der Treibhausgasneutralität ein. Im Wärmesektor ist dies nur durch eine Transformation des Energiesystems, hin zum vollumfänglichen Einsatz erneuerbarer und klimafreundlicher Energieträger in Kombination mit einer massiven Energieeinsparung, möglich. Der vorliegende Fachbericht zeigt eindringlich, wie wichtig der Ausbau der Fernwärme dabei für Nordrhein-Westfalen ist und wie sich der Energiemix der Fernwärme und der Kraft-Wärme-Kopplung als klimafreundliche Technologie verändern muss.

Die im Rahmen der Studie gewonnenen Daten fließen in das Wärmekataster NRW (www.energieatlas.nrw.de/waerme) ein und bieten so den Kommunen, Planerinnen und Planern, Energieversorgungsunternehmen und weiteren Akteurinnen und Akteuren vor Ort eine wichtige Datengrundlage für die kommunale Wärmeplanung.

Mein großer Dank geht an alle Beteiligten, die an dieser Studie mitgewirkt und so geholfen haben, die Wärmewende weiter voran zu bringen. Zu unserer großen Bestürzung ist während der Projektlaufzeit der Projektleiter des beauftragten Konsortiums, Herr Dr. Bernd Eikmeier, verstorben. Dies war für alle Beteiligten ein schwerer Schlag. Mit seinem Tod verliert die Energieforschung einen exzellenten Wissenschaftler, der über viele Jahre die Forschung in der KWK- und Fernwärmebranche mitgeprägt hat. Im Ergebnis liegt Ihnen ein Fachbericht vor, der hoffentlich Ihr Interesse findet und viele Anregungen und Erkenntnisse liefert.

Ihr



Dr. Thomas Delschen

Präsident des Landesamts für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	8
Tabellenverzeichnis.....	11
Abkürzungsverzeichnis.....	13
Zusammenfassung.....	15
1 Einleitung und Aufgabenstellung.....	18
2 Status quo der Wärme- und Kälteversorgung in NRW.....	20
2.1 Wärmebedarf.....	20
2.1.1 Raumwärme und Warmwasser.....	20
2.1.2 Wärmelinienichte.....	21
2.1.3 Prozesswärmebedarf der Industrie.....	22
2.1.4 Gesamtwärmebedarf.....	24
2.2 Raumkältebedarf.....	25
2.3 Wärmenetze in NRW.....	29
2.3.1 Datenlage.....	29
2.3.2 Klassifizierung der Netze.....	31
2.4 KWK-Anlagen in NRW.....	34
2.4.1 Erhebung der Daten.....	34
2.4.2 Ergebnis.....	36
2.5 Zusammenfassung.....	42
3 Technische und strukturelle Rahmenbedingungen der Kraft-Wärme-Kopplung.....	44
3.1 KWK-Anlagen.....	44
3.2 Klimafreundliche KWK.....	45
3.3 Chancen und Hemmnisse der KWK im Kontext der Energiewende.....	46
3.3.1 Multikriterielle Bewertung.....	47
3.3.2 SWOT-Analyse.....	50
3.4 Zusammenfassung.....	52
4 Szenarien und Rahmenbedingungen.....	54
4.1 Szenarienbetrachtung.....	54
4.2 Referenz- und 80 %-Szenario.....	55
4.3 Klimaneutrales Szenario.....	56

4.4	Fortschreibung des Wärmebedarfs.....	59
4.4.1	Raumwärmebedarf.....	60
4.4.2	Prozesswärmebedarf der Industrie.....	63
4.4.3	Zusammenfassung.....	64
4.5	Entwicklung des Raumkältebedarfs bis 2050.....	65
4.6	Potenziale und Nutzung der Erneuerbaren Energien bis 2050.....	66
4.7	Workshops	74
4.7.1	Workshop zur allgemeinen Versorgung.....	74
4.7.2	Workshop Industrie	76
4.7.3	Erkenntnisse aus den Workshops und deren Verwendung in der Studie.....	77
4.8	Sonstige Inputwerte und Datenquellen	78
4.9	Zusammenfassung	83
5	Berechnung des technischen Potenzials	84
5.1	Aufbau und Funktion von Zielsystemen	84
5.2	Methodische Vorgehensweise	85
5.3	Ergebnisse der Zielsysteme in den Szenarien	87
5.3.1	80 %-Szenario	87
5.3.2	Klimaneutral-Szenario	92
5.3.3	Diskussion der Ergebnisse.....	96
6	Räumliches Potenzial der leitungsgebundenen Wärmeversorgung in NRW	99
6.1	Methodik.....	99
6.1.1	Flächendeckende Clusterung.....	99
6.1.2	Netzausbau und -neubau	105
6.1.3	Zuordnung der Erzeugungstechniken zu den Wärmenetzen	108
6.2	Ergebnisse in den Szenarien	111
6.2.1	80 %-Szenario	111
6.2.2	Klimaneutral-Szenario	115
6.3	Theoretisches Fernwärme-Potenzial	119
7	Bewertung der Ergebnisse.....	122
7.1	Zentrale Erkenntnisse.....	122
7.2	Einordnung der Ergebnisse	125

Literatur.....	127
Anhang 1: Energieträgeranteile nach Clusterkategorie für das Klimaneutral-Szenario (Allgemeine Versorgung)	131
Anhang 2: Energieträgeranteile nach Netztyp für das Klimaneutral-Szenario (Allgemeine Versorgung)	132

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Ausschnitt der Wärmelinienkarte	22
Abbildung 2:	Gesamtwärmebedarf im Ist-Stand auf Gemeindeebene	24
Abbildung 3:	Gesamtbetrachtung der Klimaanalyse am Beispiel Münster [LANUV, 2018A].....	25
Abbildung 4:	Raumkältebedarf je Gemeinde im Ist-Stand	28
Abbildung 5:	Abhängigkeit der Kältebedichte von der Klimaklasse (bzw. Kältegruppe) und der Gebäudenutzung.....	29
Abbildung 6:	Wärmenetze in NRW	31
Abbildung 7:	Anteil Energieträger der KWK-Anlagen in NRW – elektrische Leistung	37
Abbildung 8:	Anteil Energieträger der KWK-Anlagen in NRW – thermische Leistung.....	37
Abbildung 9:	Anteil Technologien der KWK-Anlagen in NRW – elektrische Leistung	39
Abbildung 10:	Anteil Technologien der KWK-Anlagen in NRW – thermische Leistung.....	39
Abbildung 11:	Anzahl KWK-Anlagen in NRW je Gemeinde.....	41
Abbildung 12:	Thermische Leistung der KWK-Anlagen in NRW je Gemeinde.....	41
Abbildung 13:	Elektrische Leistung der KWK-Anlagen in NRW je Gemeinde.....	42
Abbildung 14:	Betrachtete Szenarien und deren CO ₂ -Budget im zeitlichen Verlauf	54
Abbildung 15:	Ergebnis der Fortschreibung des Wärmebedarfs	64
Abbildung 16:	Raumkältebedarf auf Ebene der Gemeinden 2050	65
Abbildung 17:	Entwicklung der erneuerbaren und klimafreundlichen Energieträger in der Allgemeinen Versorgung – 80 %-Szenario.....	71
Abbildung 18:	Entwicklung der erneuerbaren und klimafreundlichen Energieträger in der Allgemeinen Versorgung – Kn-Szenario.....	71
Abbildung 19:	Entwicklung der erneuerbaren und klimafreundlichen Energieträger in der energieintensiven Industrie – 80 %-Szenario	72
Abbildung 20:	Entwicklung der erneuerbaren und klimafreundlichen Energieträger in der energieintensiven Industrie – Kn-Szenario	73
Abbildung 21:	Entwicklung des Fernwärmebedarfs und des Anteils am Gesamtwärmebedarf.....	80
Abbildung 22:	Entwicklung des CO ₂ -Gesamtbudgets für die allgemeine Versorgung	80
Abbildung 23:	Entwicklung des CO ₂ -Gesamtbudgets für die energieintensive Industrie	81
Abbildung 24:	Darstellung der betrachteten Zielsysteme	85
Abbildung 25:	Absolute und relative Energieträgeranteile für die allgemeine Versorgung – 80 %-Szenario	88
Abbildung 26:	KWK-Anteile allgemeine Versorgung – 80 %-Szenario	88

Abbildung 27:	Stromerzeugung (KWK) und -aufnahme in der allgemeinen Versorgung – 80 %-Szenario	89
Abbildung 28:	Absolute und relative Energieträgeranteile in der energieintensiven Industrie – 80 %-Szenario	90
Abbildung 29:	KWK-Anteile energieintensive Industrie – 80 %-Szenario	91
Abbildung 30:	Stromerzeugung (KWK) und -aufnahme in der energieintensiven Industrie – 80 %-Szenario	91
Abbildung 31:	Absolute und relative Energieträgeranteile für die allgemeine Versorgung – Kn-Szenario	92
Abbildung 32:	KWK-Anteile allgemeine Versorgung – Szenario	93
Abbildung 33:	Stromerzeugung (KWK) und -aufnahme in der allgemeinen Versorgung – Kn-Szenario	94
Abbildung 34:	Absolute und relative Energieträgeranteile in der energieintensiven Industrie – Kn-Szenario.....	95
Abbildung 35:	KWK-Anteile energieintensive Industrie – Kn-Szenario	95
Abbildung 36:	Stromerzeugung (KWK) und -aufnahme in der energieintensiven Industrie – Kn-Szenario.....	96
Abbildung 37:	Ausschnitt Wärmedichtekarte.....	100
Abbildung 38:	Ausschluss von Gebieten mit zu geringer Wärmedichte.....	101
Abbildung 39:	Bildung von Clustern um die bestehende Wärmenetze	102
Abbildung 40:	Bildung von Clustern in Erweiterungsgebieten um bestehende Wärmenetze.....	103
Abbildung 41:	Bildung von Clustern ohne Bezug zu Bestandsnetzen	104
Abbildung 42:	Gemeinden mit Verfügbarkeit von Wasserstoff in 2050	109
Abbildung 43:	Verteilung des Fernwärmebedarfs auf die Clusterkategorien – 80 %-Szenario	111
Abbildung 44:	Verteilung des KWK-Potenzials auf die Clusterkategorien im Jahr 2050 – 80 %-Szenario.....	112
Abbildung 45:	Verteilung der Energieträger je Clusterkategorie – 80 %-Szenario.....	113
Abbildung 46:	Verteilung des Wärmebedarfs, des FW-Bedarfs sowie des KWK-Potenzials in Abhängigkeit von der Einwohnerzahl der Gemeinden im Jahr 2050 – 80 %-Szenario.....	113
Abbildung 47:	KWK-Potenzial auf Ebene der Gemeinden im Jahr 2050 – 80 %-Szenario.....	114
Abbildung 48:	Fernwärmepotenzial auf Ebene der Gemeinden im Jahr 2050 – 80 %-Szenario	114
Abbildung 49:	Verteilung des Fernwärmebedarfs auf die Clusterkategorien – Kn-Szenario	115

Abbildung 50:	Verteilung des KWK-Potenzials auf die Clusterkategorien im Jahr 2050 – Kn-Szenario	116
Abbildung 51:	Verteilung der Energieträger je Clusterkategorie – Kn-Szenario.....	117
Abbildung 52:	Verteilung des Wärmebedarfs, des FW-Bedarfs sowie des KWK-Potenzials in Abhängigkeit von der Einwohnerzahl der Gemeinden im Jahr 2050 –Kn-Szenario	117
Abbildung 53:	KWK-Potenzial auf Ebene der Gemeinden im Jahr 2050 – Kn-Szenario	118
Abbildung 54:	Fernwärmepotenzial auf Ebene der Gemeinden im Jahr 2050 – Kn-Szenario	118
Abbildung 55:	Mittlere Wärmeliniendichte im Jahr 2050 – Kn-Szenario	120
Abbildung 56:	Theoretisches Fernwärme-Potenzial je Gemeinde im Jahr 2050 – Kn-Szenario	120

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Raumwärme- und Warmwasserbedarf der Gebäude in NRW	21
Tabelle 2:	Gesamtwärmebedarf NRW	24
Tabelle 3:	Raumkältebedarf der Wohngebäude im Ist-Stand	26
Tabelle 4:	Anteil der gekühlten Flächen sowie flächenspezifischer Raumkältebedarf der Nichtwohngebäude	27
Tabelle 5:	Raumkältebedarf der Nichtwohngebäude im Ist-Stand.....	27
Tabelle 6:	Auswahl an Kriterien zur Klassifizierung der Wärmenetze.....	32
Tabelle 7:	Kennzahlen zu Bestandsnetzen nach Netztyp	33
Tabelle 8:	Kriterien zur Festlegung des Betriebsstatus der KWK-Anlagen.....	35
Tabelle 9:	KWK-Anlagen nach Energieträger im Ist-Stand.....	36
Tabelle 10:	Abgeleitete Stromkennzahlen der KWK-Anlagen	38
Tabelle 11:	Anzahl der KWK-Anlagen in NRW nach Technologien.....	40
Tabelle 12:	Ausgesuchte Kennzahlen der KWK-Technologien	44
Tabelle 13:	Bewertung der KWK im Vergleich zu anderen innovativen Wärmeversorgungsoptionen (quantitativ).....	48
Tabelle 14:	Bewertung der KWK im Vergleich zu anderen innovativen Wärmeversorgungsoptionen (qualitativ).....	49
Tabelle 15:	SWOT-Analyse für die zukünftige Rolle der KWK	51
Tabelle 16:	Gegenüberstellung wichtiger Hauptmerkmale der Szenarien 80 % und Kn für 2050	56
Tabelle 17:	Gegenüberstellung der CO ₂ - und Energiepreise der Szenarien 80 % und Kn für 2050	57
Tabelle 18:	Ausgewählte szenarioübergreifende Annahmen für den Raumwärmebedarf.....	60
Tabelle 19:	Gegenüberstellung wichtiger Hauptmerkmale der Wärmebedarfsmodellierung	61
Tabelle 20:	Entwicklung des Gebäudewärmebedarfs bis 2050 für das 80 %- und Kn-Szenario	62
Tabelle 21:	Fortschreibung des Prozesswärmebedarfs (< 500 °C) für das Kn- Szenario.....	64
Tabelle 22:	Fortschreibung der Nutzung des Warmen Grubenwassers in NRW	67
Tabelle 23:	Fortschreibung der Biomassenutzung in NRW	67
Tabelle 24:	Fortschreibung der Nutzung der industriellen Abwärme in NRW	68
Tabelle 25:	Fortschreibung der Nutzung der großen Solarthermie in NRW.....	69
Tabelle 26:	Fortschreibung der Nutzung von Grubengas in NRW.....	70

Tabelle 27:	Fortschreibung der Klärgasnutzung in NRW	70
Tabelle 28:	Fortschreibung Fernwärmebedarf und Fernwärmeerzeugung bis 2050.....	79
Tabelle 29:	Überblick über die betrachteten Erzeugungstechnologien und Energieträger	84
Tabelle 30:	Angenommene Anschlussgrade für Wärmenetze	107
Tabelle 31:	Angenommene Werte für den Einsatz der Solarthermie in Wärmenetzen bis 2050	110
Tabelle 32:	Theoretisches Fernwärme-Potenzial im Jahr 2050.....	119
Tabelle 33:	Theoretisches Fernwärme-Potenzial nach Anschlussgrad und Mindestwärmeliniendichte im Jahr 2050 – Kn-Szenario (Angabe in TWh/a)	121

Abkürzungsverzeichnis

AHK	Abhitzeessel
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BAT	Best Available Technology
Bh	Betriebsstunden
BDI	Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.
BHKW	Blockheizkraftwerk
BNetzA	Bundesnetzagentur
BZ	Brennstoffzelle
CCS	Carbon Capture and Storage (CO ₂ -Abscheidung und Speicherung)
CCU	Carbon Capture and Utilization (CO ₂ -Abscheidung und Nutzung)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DT	Dampfturbine
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EFH	Einfamilienhaus
ETS	Emission Trading System
F&E	Forschung und Entwicklung
FW	Fernwärme
GT	Gasturbine
GTZ	Gradtagzahl
GuD	Gas-und-Dampf-Kombikraftwerk
H ₂	Wasserstoff
HKW	Heizkraftwerke
HT	Hochtemperatur
IFAM	Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und angewandte Materialforschung
iKWK	innovative KWK-Systeme
Ind.	Industrie
IT NRW	Information und Technik Nordrhein-Westfalen
Kn	Klimaneutral
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung

KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
Lkw	Lastkraftwagen
LoD1	Level of Detail 1
MaStR	Marktstammdatenregister
MFH	Mehrfamilienhaus
MWIDE	Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen
NRW	Nordrhein-Westfalen
NT	Niedertemperatur
NWG	Nichtwohngebäude
ORC	Organic Rankine Cycle
PH	Passivhaus
Pkw	Personenkraftwagen
PtH	Power-to-Heat
PtX	Power-to-X
PW	Prozesswärme
Ref	Referenz
RW	Raumwärme
RWK	Raumwärme-Effizienz-Klassen
SNG	Synthetic Natural Gas
SWOT	Analyse nach den Kategorien Stärken (Strengths), Schwächen (Weaknesses), Chancen (Opportunities) und Risiken (Threats)
THG	Treibhausgas
UBA	Umweltbundesamt
Vbh	Vollbenutzungsstunden
WG	Wohngebäude
WGK	Wärmegestehungskosten
WP	Wärmepumpe
WW	Warmwasser

Zusammenfassung

Die Wärmewende hin zur Klimaneutralität ist eine enorme Herausforderung. Ein Großteil des Primärenergieverbrauchs in NRW beruht auf fossilen Energien und wird für die Wärmebereitstellung benötigt. Daher wurde, mit dem Ziel der Erreichung der Klimaneutralität im Wärmesektor, in der Potenzialstudie Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) untersucht, welchen Anteil die leitungsgebundene Wärmeversorgung sowie welche Rolle die KWK bei der allgemeinen Versorgung und der energieintensiven Industrie in NRW zukünftig haben wird. Um mögliche Schritte auf diesem Weg beschreiben zu können, wurden die Potenziale für die Stützjahre 2030, 2040 und 2050 sowie für zwei unterschiedliche Szenarien, einem 80 %- und einem Klimaneutral-Szenario, ermittelt. Die Szenarien bildeten die Grundlage für die Entwicklung von Zielsystemen, die die leitungsgebundene Wärmeerzeugung für die allgemeine Versorgung sowie auch für die energieintensive Industrie (< 500 °C) betrachten. Aufgrund der Detailtiefe konnten wertvolle Ergebnisse, wie potenzielle Fernwärmeausbaugebiete, auch auf kommunaler Ebene berechnet werden, so dass hier eine fundierte Datengrundlage bereitgestellt wird.

Das KWK-Potenzial wurde auf Basis des zu deckenden Wärme- und Kältebedarfs in NRW betrachtet und aus den entwickelten Zielsystemen abgeleitet. Dabei wurden sowohl wirtschaftliche Kriterien berücksichtigt, als auch bereits vorliegende Potenzialstudien, insbesondere zum Einsatz erneuerbarer und klimafreundlicher Energieträger im Wärmesektor. In einem weiteren Schritt wurde das erhobene Gesamtpotenzial für die allgemeine Versorgung räumlich verortet, wobei bereits bestehende Wärmenetzinfrastrukturen Berücksichtigung fanden.

Um die KWK-Potenziale und auch das Potenzial der leitungsgebundenen Wärmeversorgung für die drei Stützjahre berechnen zu können, wurde zunächst als Ausgangspunkt der Ist-Stand der Wärme- und Kälteversorgung in NRW erhoben. Hinsichtlich des Bedarfs macht der Raumwärme- und Warmwasserbedarf der Wohngebäude mit 136 TWh/a den größten Anteil aus, gefolgt von dem Raumwärmebedarf der Nichtwohngebäude mit 82,5 TWh/a. In dieser Studie wurde auch der anfallende Prozesswärmebedarf der Industrie in NRW mit einem Temperaturniveau unter 500 °C ermittelt, welcher mit 54,5 TWh/a einen etwas geringeren Anteil ausmacht. Zudem wurde festgestellt, dass der ermittelte Raumkältebedarf von 2,8 TWh/a deutlich von den Nichtwohngebäuden dominiert wird, jedoch im Vergleich zum Gesamtwärmebedarf nur einen sehr geringen Anteil von knapp 1 % ausmacht.

Zudem wurden Daten der aktuell vorhandenen KWK-Anlagen ausgewertet. So konnte über offizielle Listen eine Anzahl von über 10.500 KWK-Anlagen in NRW ermittelt werden, welche eine thermische Leistung von 14,7 GW und eine elektrische Leistung von 18,4 GW haben. Als Brennstoffe werden derzeit mit über 80 % an der thermischen Leistung vor allem fossile Energieträger wie Braunkohle, Steinkohle und Erdgas eingesetzt. Im Rahmen der Studie wurden auch die vorhandenen Wärmenetzdaten in NRW erhoben und zu einem großen Teil regional verortet. Hierbei handelt es sich um insgesamt 221 Fernwärmenetze mit klarer räumlicher Verortung und 115 Netze deren räumliche Ausbreitung abgeschätzt werden konnte. Dies umfasst einen Großteil der vorhandenen Fernwärmenetze in NRW, welche in einem weiteren Schritt in praxisnahe Netztypen kategorisiert werden konnten.

Die ermittelten Wärme- und Kältebedarfe wurden innerhalb der beiden Szenarien bis zum Jahr 2050 fortgeschrieben. Hierbei ist für das Klimaneutral-Szenario zu erkennen, dass vor allem der Raumwärmebedarf der Gebäude (inkl. Warmwasser) bis zum Jahr 2050 deutlich um

ca. 58 % auf 92 TWh/a sinkt. Auch der Prozesswärmebedarf (< 500 °C) sinkt im gleichen Zeitraum, wenn auch nur um 21 % auf 43 TWh/a. Der Raumkältebedarf steigt hingegen leicht auf ca. 3 TWh/a an.

Durch gezielte Annahmen und Randbedingungen wurden für die Ermittlung der Zielsysteme wichtige Inputwerte festgelegt. Eine Grundlage hierfür waren auch zwei Workshops mit Expertinnen und Experten der Wärmebranche. Als zentrale Eingangsgröße für die Zielsysteme wurden die Potenziale der erneuerbaren und klimafreundlichen Energieträger ermittelt und deren Anteil an der leitungsgebundenen Wärmeversorgung und der energieintensiven Industrie (< 500 °C) für das Jahr 2050 prognostiziert. Mit 7,4 TWh/a dominiert dabei im Klimaneutral-Szenario die industrielle Abwärme, aber auch die Biomasse mit 7 TWh/a, die große Solarthermie mit 4 TWh/a und die Abfallverbrennung mit 3 TWh/a nehmen einen großen Anteil ein. Mit leichten Abstrichen gilt dies auch für die Klärgasnutzung mit 1,3 TWh/a und das Warme Grubenwasser mit 1,1 TWh/a.

Die zentralen Ergebnisse dieser Studie wurden anschließend in den Zielsystemen für die allgemeine Versorgung und die energieintensive Industrie (< 500 °C) differenziert berechnet. Für das Klimaneutral-Szenario konnte für die allgemeine Versorgung eine Fernwärmeerzeugung in NRW von 27,2 TWh/a im Jahr 2050 ermittelt werden. Hier werden dann nur noch erneuerbare und klimafreundliche Energieträger eine Rolle spielen. Den größten Anteil mit 23 % macht dabei die industrielle Abwärme aus, gefolgt vom Wasserstoff (20%) und der Wärmepumpe (19%). Mit ca. 11 TWh/a werden 42 % der Wärme dabei über KWK erzeugt. Zudem konnte, wenn lediglich die Mindestwärmelinien-dichte (minimale Wärmeabnahme 750 kWh/m a) und der Anschlussgrad bei einem Fernwärmenetzneubau bzw. –ausbau als limitierende Faktoren herangezogen werden, ein theoretisches Fernwärmepotenzial von insgesamt 46 TWh/a ermittelt werden.

Bei der energieintensiven Industrie haben die Wärmepumpe (46 %) und der Wasserstoff (34 %) einen deutlich größeren Anteil an dem zu deckenden Prozess- und Raumwärmebedarf. Andere erneuerbare und klimafreundliche Energieträger spielen nur eine untergeordnete Rolle, da diese mit Ausnahme der Biomasse nur in dem Fernwärmeanteil der industriellen Wärmeversorgung enthalten sind. Auch hier beträgt der KWK-Anteil 42 %, was einer KWK-Wärmeerzeugung von 14,1 TWh/a entspricht.

Der gesamte Fernwärmebedarf in NRW beträgt im Jahr 2050 im Klimaneutral-Szenario in Summe 35,3 TWh/a, womit dann 26 % des gesamten Wärmebedarfs (< 500 °C) in NRW gedeckt werden können.

Aus den Ergebnissen dieser Studie lassen sich abschließend insbesondere folgende Erkenntnisse ableiten:

- Es ist ein deutlicher Ausbau der Nah –und Fernwärme in NRW notwendig
- Der Anteil der KWK an der leitungsgebundenen Wärmeversorgung wird abnehmen, aber weiter eine wichtige Rolle einnehmen
- Der Energiemix der KWK muss sich deutlich verändern
- Der Einsatz von erneuerbaren und klimafreundlichen Energien in der allgemeinen Versorgung und der Industrie muss im Rahmen des Transformationsprozesses deutlich zunehmen
- Wasserstoff wird auch bei der KWK-Wärmeversorgung eine maßgebliche Rolle einnehmen

- Das Potenzial der industriellen Abwärme muss deutlich stärker genutzt werden
- Die Ergebnisse der Studie bieten einen erheblichen Mehrwert für die kommunale Wärmeplanung vor Ort

Die Rolle der KWK im Energiesystem wird sich aufgrund der Klimaschutzziele zeitnah ändern, so dass die klimafreundliche und flexible KWK eine immer größere Rolle einnehmen wird.

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Veranlassung

Das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV) führt Potenzialstudien zur Energiewende in Nordrhein-Westfalen (NRW) durch. Darin werden Bestand und Potenziale erneuerbarer und klimafreundlicher Energien ermittelt und auf regionaler Ebene dargestellt. Folgende Potenzialstudien wurden bereits veröffentlicht:

- Windenergie (2012, Neuauflage 2021)
- Solarenergie (2013, Neuauflage 2018)
- Biomasse (2014)
- Oberflächennahe Geothermie (2015)
- Pumpspeicher (2016)
- Wasserkraft (2017)
- Warmes Grubenwasser (2018)
- Industrielle Abwärme (2019)

Durch die Potenzialstudien werden auf regionaler Ebene Datengrundlagen ermittelt, die u. a. Kommunen, Kreisen und Bezirksregierungen in ihrer jeweiligen Funktion als Genehmigungs- oder Planungsbehörde sowie Standortsuchenden und Planern einen Überblick für NRW schaffen. Zudem werden Grundlagendaten zur Unterstützung des weiteren Ausbaus der Erneuerbaren Energien erarbeitet und bereitgestellt.

Ein zentrales Ziel des Landes NRW ist die Erreichung der Klimaneutralität bis 2045. Die Wärmeversorgung der Gebäude und der Industrie nimmt dabei eine entscheidende Rolle ein. Neben Einspar- und Effizienzmaßnahmen in allen Gebäuden sowie Prozessen des Gewerbes und der Industrie ist die konsequente Nutzung erneuerbarer und klimafreundlicher Wärmequellen entscheidend. Aus diesem Grund wurden die Potenzialstudien um eine weitere Studie zur Rolle der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und dem damit eng verbundenen Ausbau der Nah- und Fernwärme in NRW ergänzt.

Aufgabenstellung und Vorgehensweise

Zentraler Inhalt der Studie war die Erhebung des Status quo der Wärmeversorgung durch die KWK und die Ausweisung der Potenziale dieser Technologie für die Nah- und Fernwärme sowie für die Industrie in NRW. Die Ermittlung erfolgte dabei für drei unterschiedliche Szenarien jeweils für die drei Zeitpunkte 2030, 2040 und 2050.

Um der großen Bandbreite der KWK-Technologien, ihrer Anwendung und Einzelcharakteristik gerecht zu werden, wurden zwei Systeme betrachtet:

- a) die **allgemeine Versorgung**, welche die Nah- und Fernwärme sowie die nicht energieintensive Industrie umfasst und
- b) die **energieintensive Industrie** bis zu einem Temperaturniveau von 500 °C

Objektgebundene KWK außerhalb der energieintensiven Industrie war nicht Bestandteil der Potenzialuntersuchung, da der Fokus dieser Studie aufgrund der hohen Bedeutung bei der Erreichung der Klimaschutzziele im Wärmebereich auf der Analyse der leitungsgebundenen Wärmeversorgung und der energieintensiven Industrie lag.

In die Bewertung der KWK-Potenziale flossen insbesondere wirtschaftliche und ökologische Kriterien, die bereits erstellten Potenzialstudien zur Energiewende des LANUV und alternative Wärmeerzeugungstechniken ohne KWK (z. B. Wärmepumpen) ein. Zudem wurde die bestehende Wärmenetzinfrastruktur weitgehend erhoben und in den Berechnungen berücksichtigt.

Die Studie wurde durch eine projektbegleitende Arbeitsgruppe begleitet, um die unterschiedlichen Sichtweisen auf die KWK zu berücksichtigen. Die Arbeitsgruppe setzte sich aus Fachleuten der Landesregierung, Energieversorgungsunternehmen, Forschung, Wissenschaft, Verbänden und Anlagenherstellern zusammen. Dadurch konnten zusätzliche Daten und Hintergrundinformationen bereitgestellt und die Methodik und Zwischenergebnisse diskutiert werden, um möglichst belastbare und anwendungsorientierte Daten zu ermitteln.

2 Status quo der Wärme- und Kälteversorgung in NRW

In diesem Kapitel wird der Status quo der Wärme- und Kälteversorgung in NRW dargestellt, unterteilt in den Wärmebedarf der Gebäude und der Industrie. Anschließend werden die Wärmenetzinfrastruktur und der Ist-Stand der KWK-Anlagen sowie die Methodik zur Ermittlung des Raumkältebedarfs dargestellt.

2.1 Wärmebedarf

Im Folgenden wird die Ermittlung des Wärmebedarfs dargestellt, unterteilt in die Bereiche Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme. Das verwendete Raumwärmebedarfsmodell des LANUV wurde parallel zur Bearbeitung dieser Studie aktualisiert [LANUV, 2021].

2.1.1 Raumwärme und Warmwasser

Das Raumwärmebedarfsmodell wurde in der Potenzialstudie Geothermie [LANUV, 2015A] entwickelt und seitdem stetig fortgeschrieben und aktualisiert. Die gebäudescharfe Grundlage des Modells bildet das digitale 3D-Gebäudemodell im Level of Detail 1 (LoD1, „Blockmodell“) [GEOBASIS NRW, 2021], welches um Angaben zur Baualtersklasse aus dem Zensus 2011 und Annahmen zum Sanierungszustand ergänzt wurde [IT.NRW, 2017]. Für die Nichtwohngebäude gibt es eine Trennung in geringen, mittleren und hohen flächenspezifischen Raumwärmebedarf in Abhängigkeit der Nutzungsart der Gebäude. Für die Wohngebäude ist zudem ein Warmwasserbedarf von 15 kWh/m² a angesetzt worden.

Nach einem Abgleich des Raumwärmebedarfsmodells mit realen Verbräuchen wurde der Bedarf der Wohngebäude pauschal um 10 % reduziert. Zudem wurde der Gebäudebestand auf den Datenstand 2019 aktualisiert. Auch der Raumwärmebedarf der Nichtwohngebäude wurde optimiert, indem Fehler bei der Zuordnung von beheizten Gebäuden korrigiert und Stockwerkshöhen von großen Gebäuden (z. B. Lagerhallen und Kirchen) angepasst wurden.

Ergebnis

Durch die Aktualisierung des Wärmebedarfsmodells wurden 11.036.753 Objekte erfasst. Davon wurden mit 5.556.552 mehr als die Hälfte als beheizt eingestuft. Insgesamt liegt der Bedarf für Raumwärme und Warmwasser bei 218.632 GWh/a. Auf die Wohngebäude entfallen 4.494.253 Objekte mit einem Wärmebedarf von 136.126 GWh/a (62,3 %), auf Nichtwohngebäude 1.062.299 Objekte mit 82.506 GWh/a an Raumwärmebedarf (37,7 %).

Tabelle 1 können die Anzahl der Objekte und der Wärmebedarf entnommen werden. Die Zahlen entsprechen dem Wärmebedarf im Ist-Stand und dienen als Grundlage für die weiteren Berechnungen in den Bereichen Raumwärme und Warmwasser.

Tabelle 1: Raumwärme- und Warmwasserbedarf der Gebäude in NRW

	Anzahl Gebäude	Wärmebedarf [GWh/a]
Wohngebäude (Raumwärme & Warmwasser)	4.494.253	136.126
Nichtwohngebäude (Raumwärme)	1.062.299	82.506
Summe beheizte Hausumringe	5.556.552	218.632
Nicht beheizte Hausumringe	5.480.201	
Summe beheizte und nicht beheizte Hausumringe	11.036.753	

2.1.2 Wärmelinienrichte

Eine weitere Möglichkeit der Auswertung von gebäudescharfen Information aus dem Wärmebedarfsmodell liegt in der Bestimmung von Wärmelinienrichten. Wärmelinienrichten stellen den Wärmebedarf aller Gebäude in einem Straßenabschnitt bezogen auf die Straßenabschnittslänge dar. Dazu wurde das Straßennetz aus dem Digitalen Basis-Landschaftsmodell [GEOBASIS NRW, 2020] um Autobahnen, Fahrbahnachsen und Geometriefehler bereinigt. Es wurde so aufbereitet, dass jeweils von Kreuzung zu Kreuzung Straßenabschnitte entstehen, die sogenannten Wärmelinien. Anschließend wurden die Hausumringe dem jeweils nächst gelegenen Straßenabschnitt zugeordnet.

Abbildung 1 zeigt beispielhaft für ein Gebiet, wie viel Wärme pro Straßenmeter nachgefragt wird. Die Wärmelinienrichtendarstellung eignet sich für die Bewertung von leitungsgebundenen Wärmeversorgungsoptionen und ist eine wichtige Datengrundlage für die weitere Berechnung.



Abbildung 1: Ausschnitt der Wärmeliniendichtekarte

2.1.3 Prozesswärmebedarf der Industrie

Für die KWK ist neben der allgemeinen Wärmeversorgung auch der Prozesswärmebedarf der Industrie als Wärmesenke relevant. Der für das Basisjahr ermittelte Prozesswärmebedarf wurde zunächst in vier Anwendungsgruppen aufgeteilt, um in den weiteren Arbeitsschritten eine möglichst differenzierte Betrachtung und Fortschreibung zu ermöglichen:

1. Energieintensive Branchen (allgemein)
2. Energieintensive Branchen (nur chemische und pharmazeutische Erzeugnisse)
3. Übrige Industrie und verarbeitendes Gewerbe (nicht Gruppe 1 und 2)
4. Hallenbäder

In **Gruppe 1** sind die KWK-geeigneten Wärmebedarfe bis 500°C der CO₂-intensiven Branchen aus dem Modell WISEE-EDM_d [WUPPERTAL INSTITUT, 2021A] enthalten. Das Modul WISEE setzt auf eine umfangreiche Datenbank zu Industrieprozessen und Standorten auf. Als KWK-geeignete Wärmebedarfe werden hier nur Dampfanwendungen angesehen, also keine brennstoffbeheizten Öfen oder Schmelzen. Da derzeit die Dampfparameter für Frischdampf in einem Dampfturbinenprozess bei max. 580°C bis 600°C liegen [BINE, 2010], wird als maximal nutzbares Temperaturniveau für KWK-Anwendungen konservativ eine Grenze von 500°C angesetzt. Im Hinblick auf die KWK-geeigneten Wärmebedarfe konnte für die berücksichtigten Branchen der Dampfbedarf auf Basis von Einzelprozessen simuliert werden. Neben der Entwicklung der Prozesstechnik waren zudem Produktionsmengen die entscheidende Eingangsgröße.

In der Datenbank des Modells werden 50 konkrete Standorte (mit oftmals mehreren Einzelprozessen) geführt, sodass der Prozesswärmebedarf räumlich verortet werden konnte. Insgesamt lag der Prozesswärmebedarf dieser Gruppe im Jahr 2016 bei 38 TWh/a.

Für die restlichen Branchen wurde der Prozesswärmebedarf bis 500°C auf Basis von Energieintensitäten ermittelt. Insgesamt handelt es sich hier noch einmal um 16 TWh/a. Mit 5 TWh/a entfällt ca. ein Drittel dieser Menge auf die Branchen *Sonstige chemische Erzeugnisse* und *Pharmazeutische Erzeugnisse*. Die Standorte dieser Branchen wurden über Mitgliederlisten des Verbands der Chemischen Industrie e.V. [VCI, 2020] sowie aus dem Chemieatlas [CHEMIEATLAS, 2020] ermittelt und bilden **Gruppe 2**. Es konnte keine individuelle Verteilung des Prozesswärmebedarfs auf die einzelnen Betriebe vorgenommen werden, sodass durch Division der 5 TWh/a durch die Summe der Energiebezugsfläche aller zur Gruppe 2 gehörender Objekte ein spezifischer Prozesswärmebedarf in Höhe von 1.067 kWh/m²·a berechnet werden konnte. Dieser wurde allen Objekten aus der zweiten Gruppe zusätzlich zum Raumwärme- und Warmwasserbedarf aufgeschlagen.

Gruppe 3 enthält alle Gebäude, die aufgrund ihrer Nutzungsart (z. B. Fabrik, Gebäude für Gewerbe und Industrie, Produktionsgebäude) der Industrie bzw. dem verarbeitenden Gewerbe zugeordnet werden konnten und nicht Teil der Gruppe 1 oder 2 waren. Aufgrund der Nutzungsart war es wahrscheinlich, dass diese Objekte einen Prozesswärmebedarf aufweisen. Dieser konnte jedoch nicht individuell je Betrieb ermittelt werden, ebenso war eine Zuordnung der Gebäude zu den Branchen nicht möglich. Daher wurden die verbleibenden 11 TWh/a gleichmäßig über die Energiebezugsfläche verteilt. Daraus ergab sich ein flächenspezifischer Prozesswärmebedarf in Höhe von 45 kWh/m²·a. Dieser wurde allen Objekten aus Gruppe 3 zusätzlich zum Raumwärme- und Warmwasserbedarf aufgeschlagen.

Auch wenn Hallenbäder nicht zur Industrie gehören, bilden sie aufgrund des hohen individuellen Prozesswärmebedarfs die **Gruppe 4**. Hier wurde ein Wert in Höhe von 200 kWh/m²·a zu dem schon vorhandenen Raumwärmebedarf von 300 kWh/m²·a für Nichtwohngebäude mit einem hohen Wärmebedarf addiert. Dies ergibt sich aus einem Abgleich mit bekannten Verbrauchsdaten. Den Hallenbädern wurde somit ein flächenspezifischer Wert in Höhe von 500 kWh/m²·a zugewiesen.

2.1.4 Gesamtwärmebedarf

In Tabelle 2 ist die Aufteilung des Wärmebedarfs getrennt nach Wohngebäuden, Nichtwohngebäuden und der Industrie sowie Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme für den Ist-Stand zusammengefasst.

Tabelle 2: Gesamtwärmebedarf NRW

	Wohngebäude [GWh/a]	Nichtwohngebäude [GWh/a]					Gesamt [GWh/a]
		Sonstige Nichtwohngebäude	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4	
Raumwärme, Warmwasser	136.126	48.038	1.007	701	32.490	270	218.632
Prozesswärme	0	0	37.870	5.400	11.036	181	54.487
Summe	136.126	48.038	38.877	6.101	43.526	451	273.119

Die räumliche Verteilung des Wärmebedarfs auf Gemeindeebene wird in Abbildung 2 dargestellt. Gut zu erkennen ist, dass die höchsten Wärmebedarfe in den hochverdichteten Gebieten liegen, insbesondere im Ruhrgebiet, im Rheinland sowie in den weiteren Großstädten.

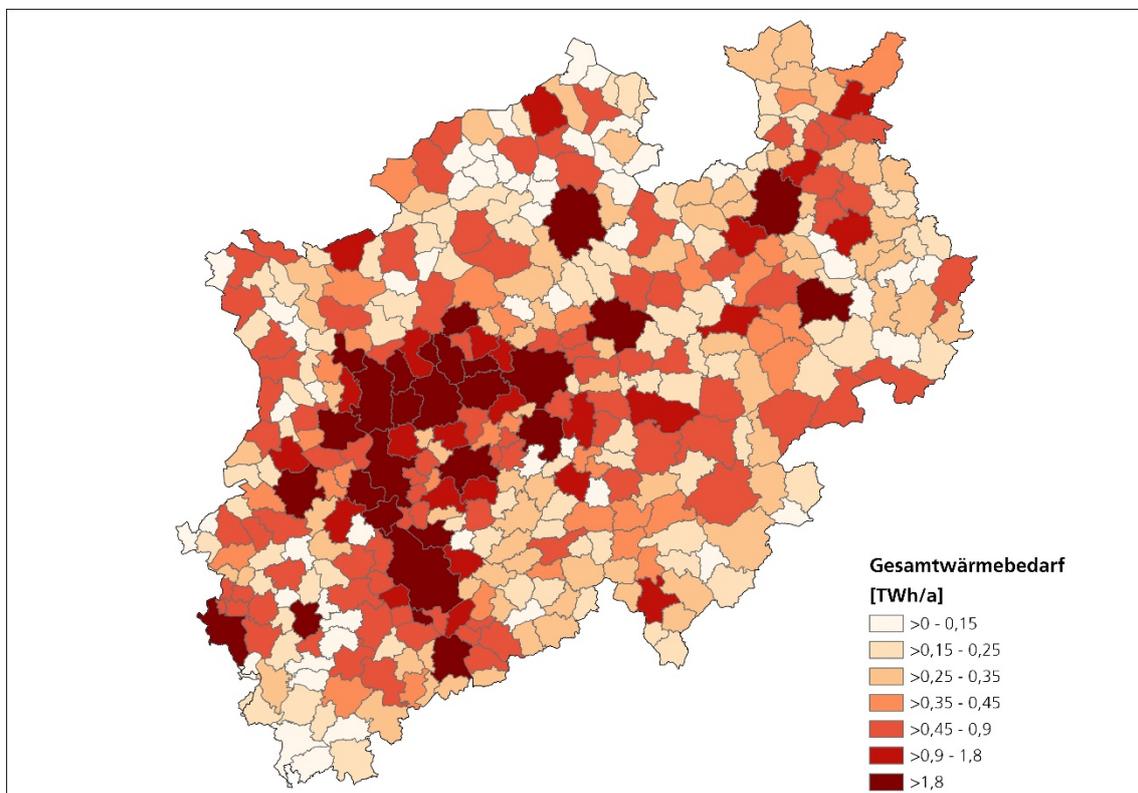


Abbildung 2: Gesamtwärmebedarf im Ist-Stand auf Gemeindeebene

2.2 Raumkältebedarf

Aufgrund der klimatischen Bedingungen in NRW ist der Kältebedarf im Vergleich zum Wärmebedarf deutlich geringer und heute bei der Energieversorgung eher von untergeordneter Bedeutung.

Die Ermittlung des Raumkältebedarfs im Ist-Stand beruhte im Wesentlichen auf zwei Studien. Zum einen auf der Studie *Klimaschutz durch Reduzierung des Energiebedarfs für Gebäudekühlung* vom Umweltbundesamt [UBA, 2011] und zum anderen auf der *Klimaanalyse NRW* [LANUV, 2018A]. Für Wohngebäude geht aus [UBA, 2011] hervor, dass in Deutschland pro 100 Haushalte 1,4 Klimaanlage mit einer durchschnittlichen elektrischen Leistung von 1 kW und einer durchschnittlichen Vollbenutzungsstundenzahl von 200 bis 500 h pro Jahr (Vbh/a) installiert sind. Bei einer Anzahl von 8.752.000 Haushalten [IT NRW, 2020] ergibt sich so eine Anzahl von 122.528 Klimaanlage in Wohngebäuden in NRW.

Über die Klimaanalyse NRW konnte jedes Gebäude einer Klimaklasse zugeordnet werden. Die Klimaklassen geben in fünf Stufen an, wie hoch die thermische Belastung in einem Gebiet ist. Abbildung 3 veranschaulicht die Gesamtbetrachtung der Klimaanalyse am Beispiel der Stadt Münster.

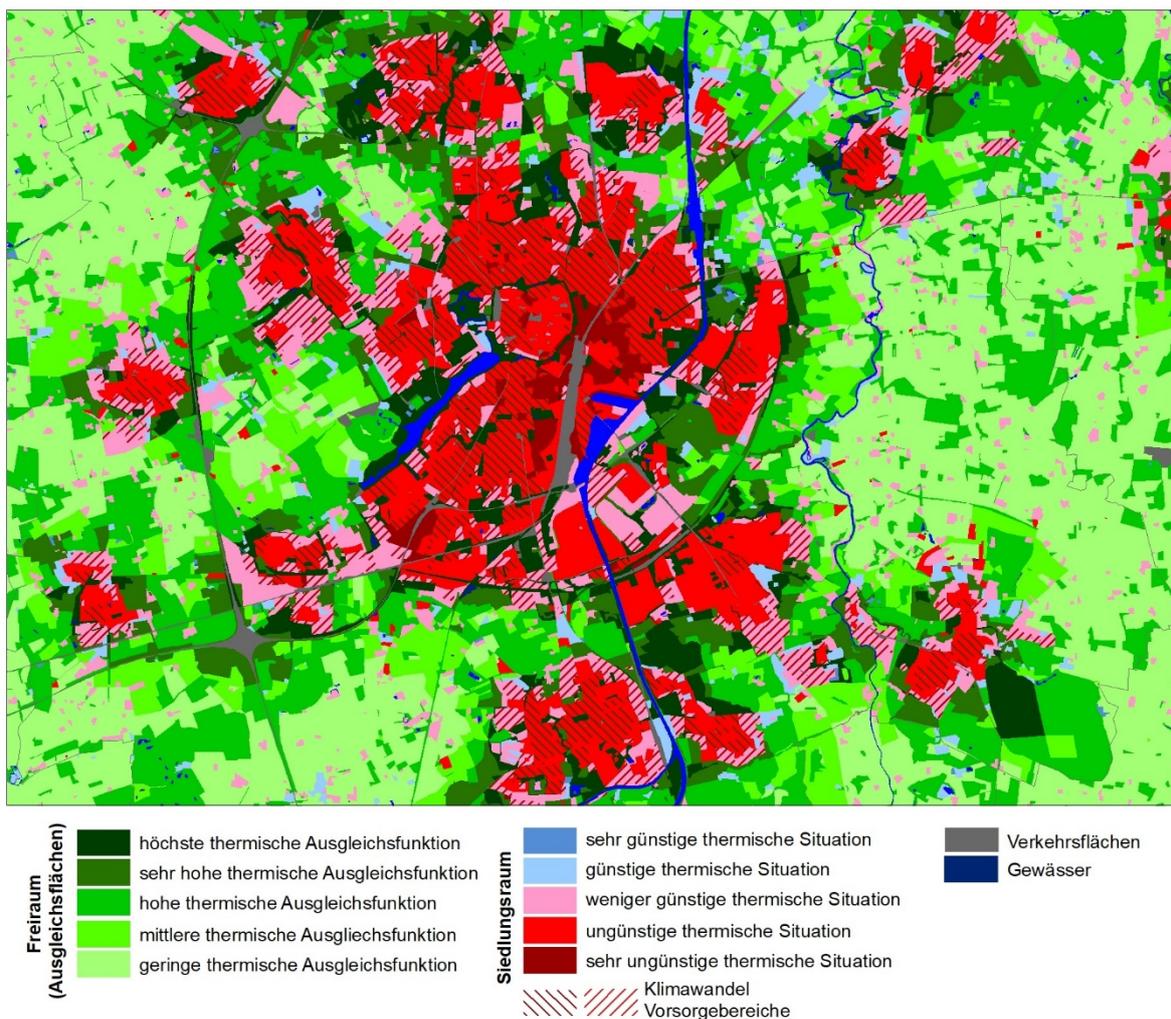


Abbildung 3: Gesamtbetrachtung der Klimaanalyse am Beispiel Münster [LANUV, 2018A]

Für die Ermittlung des Kältebedarfs wurde davon ausgegangen, dass nur in den drei Klimaklassen mit der höchsten Belastung ein Kältebedarf aufgrund von Hitzebelastung vorhanden ist. Dieser erhöhte sich mit steigender klimatischer Belastung. Bei angenommenen 1,4 Klimaanlage je 100 Haushalte wurde dieser Wert auf Basis der Klimaklasse dementsprechend halbiert (0,7) oder um 50 % erhöht (2,1). Dies ist ein äußerst pauschaler Ansatz mit dem Ziel, die zunehmende Hitzebelastung durch den Klimawandel auch im Raumkältebedarf abbilden zu können.

Es wurden demnach aus den entsprechenden Gebieten der Klimaanalyse drei Kältegruppen zur Berechnung des Kältebedarfs für diese Studie gebildet:

- Kältegruppe 1: weniger günstige thermische Situation
- Kältegruppe 2: ungünstige thermische Situation
- Kältegruppe 3: sehr ungünstige thermische Situation

Für die Kältegruppen wurden jeweils die Energiebezugsflächen aus dem Raumwärmebedarfsmodell des LANUV und daraus abgeleitet die Anzahl der Klimaanlage ermittelt. Wird von einer durchschnittlichen Anzahl an Vollbenutzungsstunden von 400 Stunden pro Jahr und einer Leistung von 1 kW_{el} ausgegangen [UBA, 2011], ergibt sich insgesamt ein Kühlbedarf in Höhe von 49 GWh/a für die Wohngebäude. Tabelle 3 kann die Aufteilung auf die Kältegruppen entnommen werden.

Tabelle 3: Raumkältebedarf der Wohngebäude im Ist-Stand

	Kältegruppe 1	Kältegruppe 2	Kältegruppe 3
Energiebezugsfläche [m ²]	366.231.244	344.022.468	28.026.441
Anzahl Klimaanlage pro 100 Haushalte	0,7	1,4	2,1
Anzahl der Klimaanlage Gesamt	39.420	74.058	9.050
Kühlbedarf bei 400 Vbh/a und 1 kW_{el} [GWh/a]	15,8	29,6	3,6

Für die Nichtwohngebäude geht aus [UBA, 2011] sowohl der Anteil der gekühlten Fläche als auch der flächenspezifische Raumkältebedarf in Abhängigkeit von der Gebäudenutzung hervor, wie in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Anteil der gekühlten Flächen sowie flächenspezifischer Raumkältebedarf der Nichtwohngebäude

Gebäudenutzung	Anteil gekühlte Fläche	Raumkältebedarf [kWh/m ² a]
Hotels, Cafés, Restaurants	30 %	17
Krankenhäuser	20 %	19
Erziehung, Bildung	14 %	11
Büros, Verwaltung	51 %	20
Handel, Einzelhandel	80 %	33
Flughäfen	100 %	33

Quelle: eigene Darstellung nach [UBA, 2011]

Die Gebäudefunktionen aus dem Wärmebedarfsmodell wurden den Gebäudenutzungen aus der obigen Tabelle zugeordnet und die gekühlte Energiebezugsfläche über den entsprechenden Anteil ermittelt. Analog zu den Wohngebäuden wurde wiederum davon ausgegangen, dass der Raumkältebedarf umso höher ist, je höher die Hitzebelastung auf Basis der Klimaanalyse NRW ist. Ausgenommen wurden Gebäude, bei denen eine Kältenutzung rein funktional und somit unabhängig von der Kältegruppe ist. Dazu zählten Flughäfen sowie der Handel und Einzelhandel, weshalb Gebäude dieses Typs bei den drei relevanten Kältegruppen jeweils identische Raumkältebedarfswerte aufweisen. Krankenhäuser bildeten ebenfalls einen Sonderfall, da bei Krankenhäusern davon ausgegangen wurde, dass grundsätzlich ein Raumkältebedarf vorliegt, dieser jedoch bei steigender Hitzebelastung ebenfalls ansteigt. In Tabelle 5 sind die angenommenen flächenspezifischen Raumkältebedarfe je Gebäudenutzung in Abhängigkeit von der Kältegruppe zusammengefasst. Insgesamt ergibt sich für die Nichtwohngebäude ein Raumkältebedarf in Höhe von 2,8 TWh/a.

Tabelle 5: Raumkältebedarf der Nichtwohngebäude im Ist-Stand

Gebäudefunktion	Flächenspezifischer Raumkältebedarf [kWh/m ² a]			Summe Raumkältebedarf [GWh/a]
	Kältegruppe 1	Kältegruppe 2	Kältegruppe 3	
Hotels, Cafés, Restaurants	3	6	9	29,7
Krankenhäuser	2*	5	7	56,6
Erziehung, Bildung	1	2	4	80,5
Büros, Verwaltung	7	15	22	471,5
Handel, Einzelhandel	25	25	25	2.128,2
Flughäfen	33	33	33	16,6

*Dieser Wert gilt auch für die Krankenhäuser, die keiner Kältegruppe zugeordnet wurden

Die Summe des Raumkältebedarfs in Wohn- und Nichtwohngebäuden in NRW beträgt somit 2.832 GWh/a und wird deutlich durch die Nichtwohngebäude dominiert. Innerhalb der Nichtwohngebäude entfällt der größte Anteil wiederum auf den Handel und Einzelhandel (2.128 GWh/a) sowie die Büros und Verwaltungen (471,5 GWh/a).

Abbildung 4 zeigt den Raumkältebedarf der Wohn- und Nichtwohngebäude auf Ebene der Gemeinden in NRW im Ist-Stand. Die höchsten Raumkältebedarfe liegen in den Gemeinden mit der höchsten Anzahl an Nichtwohngebäuden aus den Bereichen Handel, Einzelhandel sowie Büros und Verwaltungen. Hierbei handelt es sich insbesondere um die Großstädte. Im Vergleich zur Karte des Wärmebedarfs (vgl. Abbildung 2) zeigt sich dabei eine hohe Übereinstimmung.

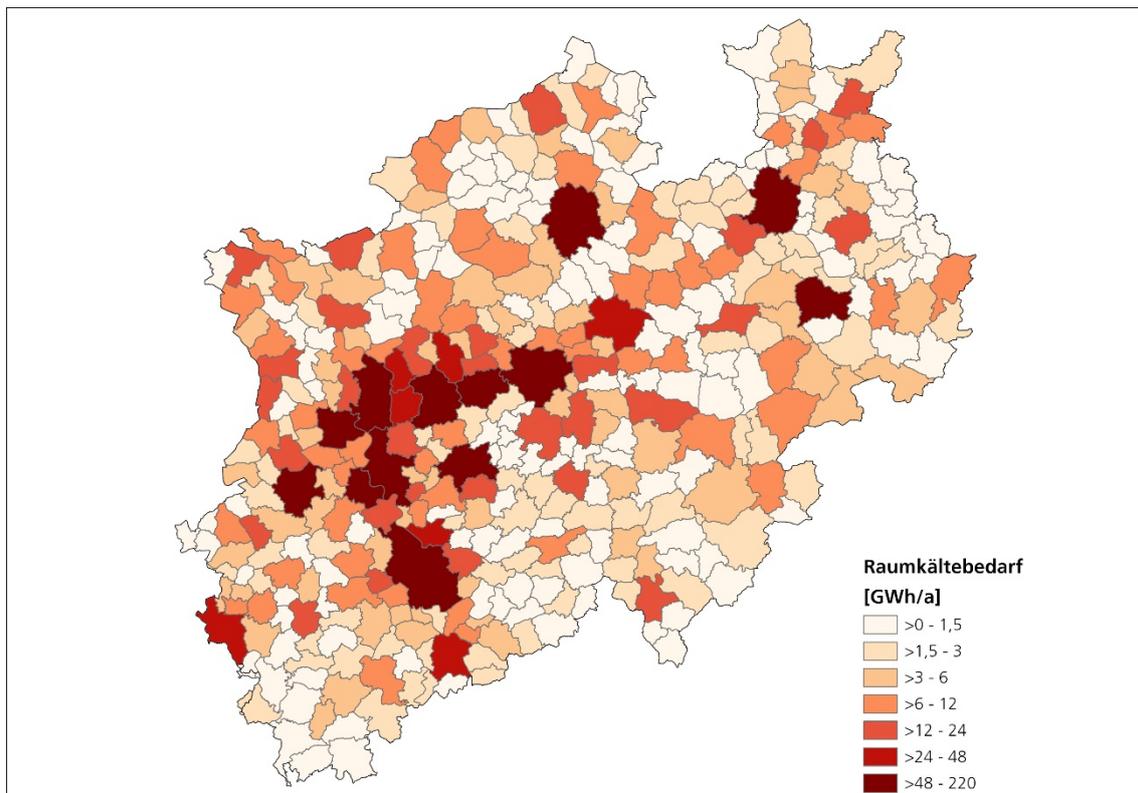


Abbildung 4: Raumkältebedarf je Gemeinde im Ist-Stand

Innerhalb der Gemeinden ergeben sich durch die unterschiedlichen Kältegruppen und Gebäudefunktionen deutliche Unterschiede in Bezug auf die Kältebedichte. Abbildung 5 zeigt auf der linken Seite die Klimaklassen nach [LANUV, 2018A], für die ein Kältebedarf angenommen wurde (je dunkler das Rot umso ungünstiger ist die thermische Situation) und die Gebäude nach Funktion und dem damit verbundenen Kältebedarf. Auf der rechten Seite ist die Kältebedichte dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass die höchsten Kältebedichten in den Gebieten auftreten, in denen die thermische Situation am ungünstigsten ist sowie in den Gebieten, in denen es besonders viele Gebäude der Funktionen Handel und Einzelhandel, Büro und Verwaltung sowie Krankenhäuser gibt. Besonders geringe Kältebedichten finden sich in Wohngebieten. Zudem werden die Bereiche sichtbar, in denen kein Kältebedarf in dieser Studie angenommen wurde, entweder aufgrund der Klimaklasse oder aufgrund der Gebäudefunktion.

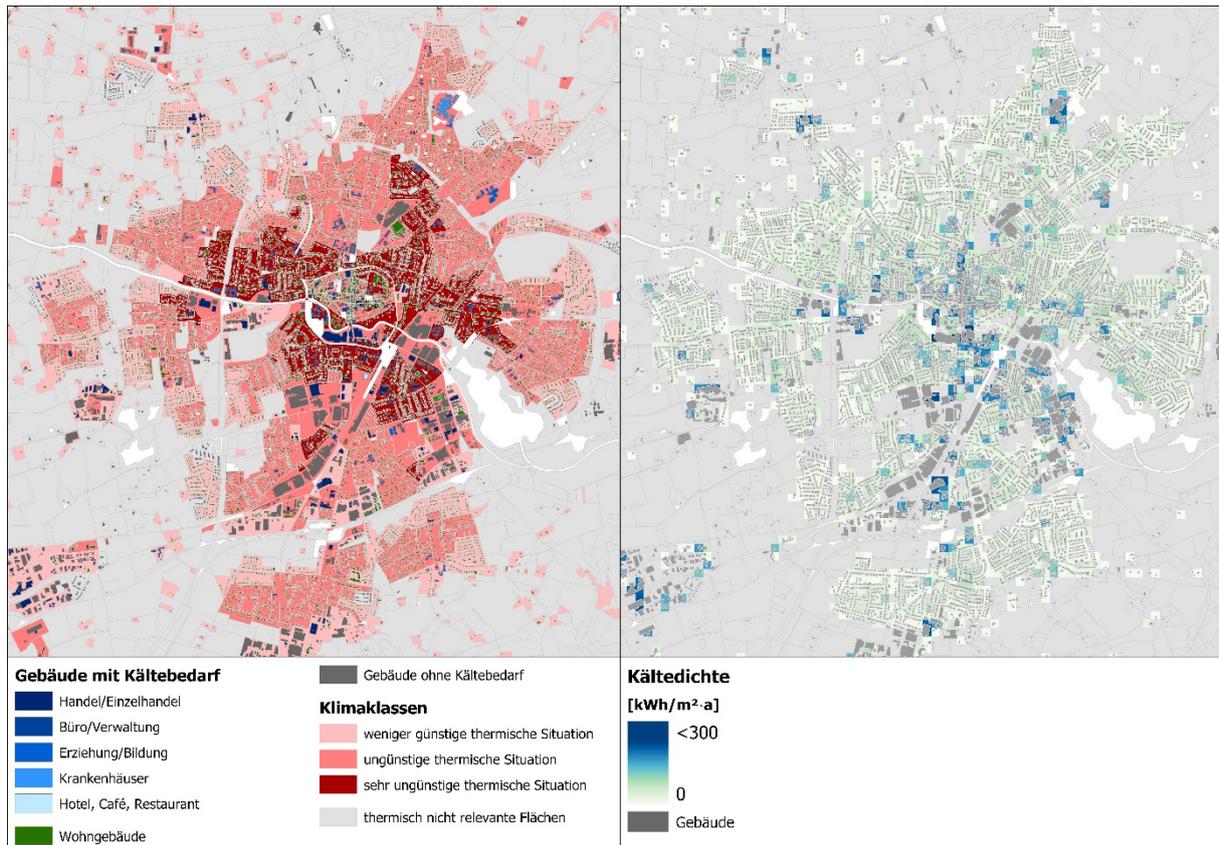


Abbildung 5: Abhängigkeit der Kältebedichte von der Klimaklasse (bzw. Kältegruppe) und der Gebäudenutzung

Der hier errechnete Kältebedarf ist ein erster Ansatz, um den Aspekt der Kälteversorgung bei der weiteren Analyse berücksichtigen zu können. Der verwendete Wert von 1,4 Klimaanlagen pro 100 Haushalte stammt aus Mangel an verwendbaren Quellen zum Thema Kälte, deren Methodik zu der hier erstellten Studie passt, aus einer älteren Studie. Aufgrund der in den letzten Jahren zunehmenden Hitzebelastung ist anzunehmen, dass dieser Wert heute höher liegt und der Kältebedarf daher eher unterschätzt als überschätzt wird.

2.3 Wärmenetze in NRW

Für die Bearbeitung dieser Studie war es wichtig einen guten Überblick über die Fern- und Nahwärmenetze in NRW zu haben. Im Folgenden Kapitel wird die Ermittlung der Fernwärmenetzstruktur in NRW dargestellt.

2.3.1 Datenlage

Vorhandene Wärmenetze haben eine hohe Relevanz bei der Ermittlung des KWK-Potenzials, da das vorhandene Potenzial beim Ausbau bestehender Netze in der Regel wirtschaftlicher zu erschließen ist als beim Neubau eines Netzes. Zur Erfassung der Wärmenetze in NRW wurden unterschiedliche Quellen genutzt. Zunächst fand eine Befragung der Energieversorgungsunternehmen und Netzbetreiber zu den betriebenen Wärmenetzen statt.

Im Zuge dieser Kontaktaufnahme wurden neben einem georeferenzierten Netzverlauf die folgenden Informationen angefragt:

- Temperaturniveau (Vorlauf Sommer/Winter, Rücklauf)
- Betrieb von Dampfnetzen
- Höhe der Gesamterzeugungs- bzw. -abgabemengen der einzelnen Netze
- Höhe des KWK-Anteils
- Höhe des Anteils an erneuerbarer Wärme
- Höhe des Anteils industrieller Abwärme
- Primärenergiefaktor

In einem weiteren Schritt wurden darüberhinausgehende Informationen im Internet recherchiert. Teilweise waren die mit Wärmenetzen versorgten Gebiete über Karten und Pläne abrufbar und konnten so digitalisiert werden.

Eine weitere Informationsquelle über die Lage von Wärmenetzen sind Informationen aus dem Zensus 2011 zum Heizungstyp Fernheizung, die in einem Raster von 100 x 100 m vorliegen [IT NRW, 2017]. Diese wurden insbesondere genutzt, um die räumliche Lage von Wärmenetzen abschätzen zu können, für die keine georeferenzierten Netzpläne zur Verfügung standen. Dabei wurde eher konservativ vorgegangen, sodass nur wenn ein ausreichend großes zusammenhängendes Gebiet (mindestens 10 Rasterzellen) oder eine ausreichende Anzahl an Nennungen (mindestens 20) auftrat, von einem Wärmenetz ausgegangen wurde. Diese Kriterien führten zu einer großen Anzahl an potenziellen Netzgebieten. Ein Abgleich mit bekannten Netzverläufen zeigte, dass die Daten aus dem Zensus nicht in allen Fällen verlässlich sind. Daher wurden die Informationen nur dann verwendet, wenn zusätzlich aus bisherigen Recherchen bereits bekannt war, dass in einem Gebiet ein Wärmenetz liegt. Anhand der Informationen aus dem Zensus konnten diese Netze dann genauer verortet werden.

In der Summe haben 42 Energieversorgungsunternehmen bzw. Netzbetreiber einen georeferenzierten Netzverlauf ihrer Wärmenetze zur Verfügung gestellt. Auf diese Weise konnten 204 einzelne Netze in ihrer räumlichen Ausdehnung dargestellt werden. Für 3 weitere Energieversorgungsunternehmen bzw. Netzbetreiber konnten 17 Netzpläne aus dem Internet digitalisiert werden, sodass ebenfalls ein sehr detaillierter georeferenzierter Verlauf vorlag.

Durch eine in den letzten Jahren sukzessive aufgebaute Datenbank, ist von 59 weiteren Energieversorgungsunternehmen bzw. Netzbetreibern bekannt, dass sie 115 Wärmenetze betreiben. Allerdings lag für diese kein georeferenzierter Netzverlauf vor. Hier konnte jedoch zum Teil aus den Daten des Zensus 2011 die Ausdehnung abgeschätzt werden.

Insgesamt konnten durch die Vorgehensweise in 146 Gemeinden 336 Wärmenetze identifiziert werden. Abbildung 6 zeigt in blau diejenigen Netze, die georeferenziert vorliegen. Jede Gemeinde, in der es mindestens ein Wärmenetz mit unbekannter räumlicher Ausdehnung gibt, ist auf der Karte durch eine rote Markierung in der Gemeindemitte gekennzeichnet.

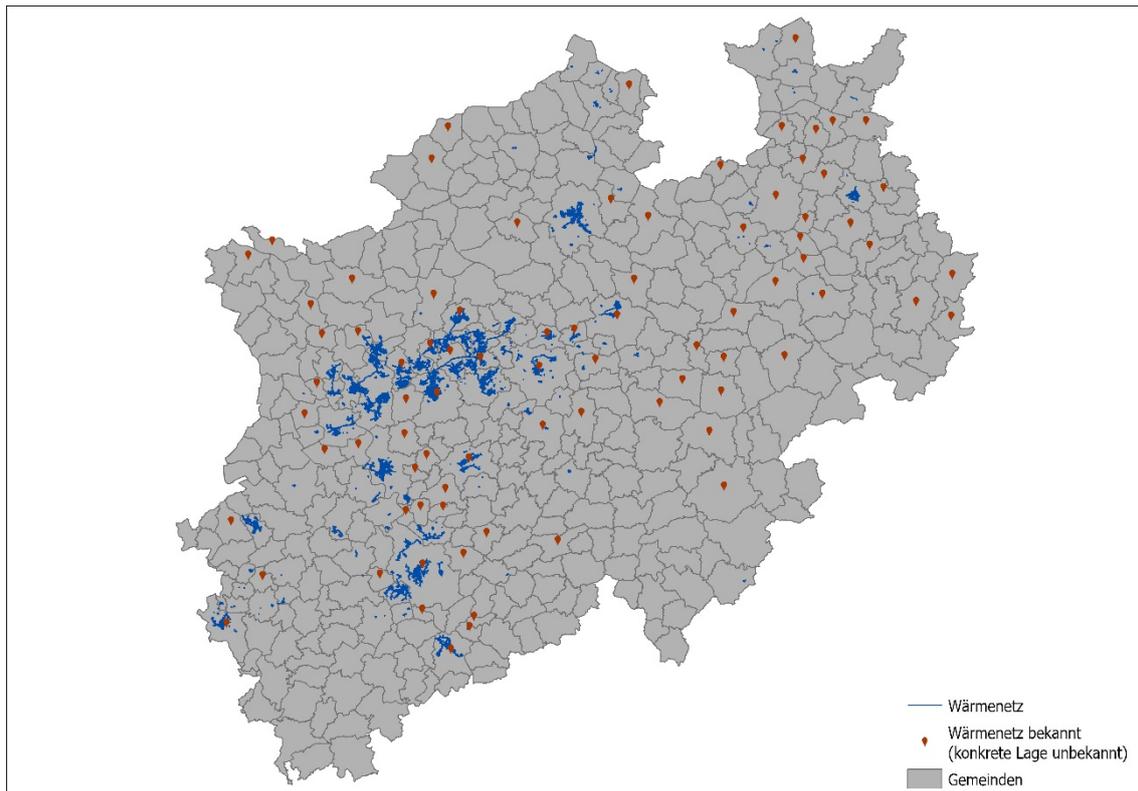


Abbildung 6: Wärmenetze in NRW

Die Länge der Netze mit bekannter räumlicher Ausdehnung liegt insgesamt bei 4.071 km (einfach Länge). Aus dieser Summe sind die Hausanschlussleitungen herausgerechnet, falls diese vom EVU bzw. Netzbetreiber mit überliefert wurden. Die geschätzte Länge der Wärmenetze, für die keine konkrete räumliche Ausdehnung bekannt ist, liegt bei rund 600 km. Um diese Schätzung vornehmen zu können, wurde der Mittelwert der Netzlängen je Netztyp (vgl. Kapitel 2.3.2) gebildet und den Netzen ohne bekannte räumliche Ausdehnung zugeordnet. In Tabelle 6 sind die wichtigsten Zahlen zu den Fernwärmenetzen übersichtlich dargestellt.

2.3.2 Klassifizierung der Netze

Die 221 Netze, für die eine konkrete räumliche Ausdehnung vorlag, wurden im Anschluss an die Datenermittlung klassifiziert. Diese Klassifizierung wurde unter anderem zur Bildung von Clustern genutzt (vgl. Kapitel 6), da die Möglichkeit, ein bereits bestehendes Netz im Erweiterungsgebiet auszubauen, auch vom Netztyp abhängig ist. Erweiterungsgebiete sind die Bereiche, die sich unmittelbar an die bereits mit einem Wärmenetz versorgten Gebiete anschließen und sich daher für einen Ausbau der bestehenden Wärmenetze besonders anbieten. Die Möglichkeiten eines Netzausbaus im Erweiterungsgebiet sind umso besser, je größer das Bestandsnetz ist.

Die Klassifizierung der Netze wurde in Anlehnung an [BEE, 8KU & AGFW, 2020] durchgeführt. Eine Übersicht über ausgewählte Kriterien ist Tabelle 6 zu entnehmen.

Tabelle 6: Auswahl an Kriterien zur Klassifizierung der Wärmenetze

Typ	1	2	3	4	5	6	7
	Großstadt	Mittelstadt	Kleinstadt oder Bestands-inselnetz in Mittel- oder Großstadt	Neueres Bestands-netz	Ländlicher Raum	Insel	Industrie
Netzlängen	>80 km	10-100 km	<30/<10 km	<30 km	2–10 km	<10 km	<20 km
Temperatur	>>100°C	>100°C	>100°C	70-90°C	70-90°C	>70°C	>100°C
Siedlungsdichte	MFH, Ind.-Gebiete	MFH, Gewerbegebiete		mittelgroße MFH, Gewerbe	EFH, kl. MFH, Öff. Gebäude	mittelgroße MFH, Gewerbe	
Sanierungs-zustand Gebäude	teilsaniert			gut saniert	teilsaniert	Neubau	wenige Abnehmer
Raumordnung	Stadt-zentrum	Stadt-zentrum, Möglichkeit für Biomasse-lagerung begrenzt	abseits Zentrum, gute Möglichkeit für Biomasselagerung		Stadttrand oder ländlicher Raum	siehe Typ 3, 4	
Erweiterungs-möglichkeit	hohe – mittlere Wärmedichten	mittlere Wärmedichten	eingeschränkte Ausbaumöglichkeiten				

Quelle: In Anlehnung an [BEE, 8KU & AGFW, 2020]

Nicht alle in Tabelle 6 genannten Kriterien konnten in gleichem Maße für die Netze zur Klassifizierung herangezogen werden. Die wichtigsten Kriterien waren Einwohnerzahl, Netzlänge und Wärmedichte. Zudem wurden Siedlungsdichte, Sanierungszustand und Angaben zur Raumordnung ausgewertet. Die Information zum Temperaturniveau wurde nicht von allen Netzbetreibern zur Verfügung gestellt und konnten nur teilweise bei Recherchen ermittelt werden. Sie konnten daher auch nur in diesen Einzelfällen ausgewertet werden. Die Kriterien beschreiben typische Merkmale eines Netztyps, wobei im Einzelfall Abweichungen auftreten können. War keine eindeutige Zuordnung möglich, wurde eine Einzelfallentscheidung getroffen, bei der geprüft wurde, zu welchem Netztyp die meisten Kriterien passten.

In Tabelle 7 ist das Ergebnis der Netztypisierung dargestellt, einerseits für georeferenzierte Netze und andererseits für die Netze, deren genaue Lage unbekannt war. Sie zeigt, wie viele Netze den jeweiligen Typen zugeordnet werden konnten, wie lang sie summarisch und im arithmetischen Mittel sind sowie die Höhe der mittleren Wärmeliniedichte.

Tabelle 7: Kennzahlen zu Bestandsnetzen nach Netztyp

Netztyp	Anzahl		Netzlänge [km]		mittlere Netzlänge [km]		mittlere Wärmeliniedichte [kWh/m a]	
	Georef.	Unge. Lage	Georef.	Unge. Lage	Georef.	Unge. Lage	Georef.	Unge. Lage
1	35	-	3.079	-	88	-	4.924	-
2	11	7	540	314	49	45	3.983	x
3	125	100	344	271	3	3	4.448	x
4	24	-	63	-	3	-	4.470	-
5	7	8	26	29	4	4	2.169	x
6	12	-	9	-	1	-	2.013	-
7	7	-	10	-	2	-	6.327	-

Es zeigt sich deutlich, dass bei den georeferenzierten Netzen die höchsten Wärmeliniedichten im Bereich der Industrienetze liegen, was nicht zuletzt aus ihrer geringen Länge resultiert. Es folgen die Netze in den Großstädten, in denen die mit Abstand größten Netze liegen. Die Wärmedichte sinkt in den Mittelstädten, genauso wie die Netzlänge. Die recht hohen Wärmeliniedichten in den Kleinstädten sowie den neueren Netzen ist durch die sehr kurzen Netzlängen bedingt. Viele dieser Netze orientieren sich an Ankerkunden, die eine hohe Wärmeliniedichte garantieren. Dazu kommt, dass der Anschlussgrad höher ist als bei den Netzen der Groß- und Mittelstädte. In Neubaugebieten sowie dem ländlichen Raum ist die Wärmeliniedichte deutlich geringer.

Auch die 115 Netze, für die kein konkreter Netzverlauf vorliegt, wurden einem Netztyp zugeordnet. Dies geschah insbesondere über die Einwohnerzahl in der Gemeinde, die Informationen aus dem Zensus 2011 und den Abgleich mit Luftbildern. Hier zeigt sich, dass der Großteil dieser Netze im Bereich der Kleinstädte bzw. Bestandsinselnetz in einer Mittel- oder Großstadt liegt. Die Netzlänge hat eine ähnliche Dimension wie bei den georeferenzierten Netzen. Da der genaue Verlauf nicht bekannt ist, konnte bei diesen Netzen die mittlere Wärmeliniedichte nicht bestimmt werden.

2.4 KWK-Anlagen in NRW

Im Folgendem Kapitel wird die Ermittlung des Status quo der KWK-Anlagen in NRW näher beschrieben und das Ergebnis vorgestellt.

2.4.1 Erhebung der Daten

Das Ziel der Erfassung der KWK-Anlagen war eine möglichst vollständige Datenbasis heutiger in Betrieb befindlicher KWK-Anlagen in NRW zu schaffen und diese räumlich zu verorten. Zur Erhebung dieser Daten wurden innerhalb dieser Studie Listen und Register öffentlicher sowie über das LANUV zugänglicher Quellen gesammelt, einheitlich aufbereitet, zusammengeführt und miteinander abgeglichen. Zudem wurden die Einträge der verwendeten Listen auf ihre Richtigkeit plausibilisiert.

Verwendete Quellen

Neben beim LANUV geführten Daten zu den erneuerbaren Energieträgern wurden zusätzlich Register herangezogen, die von der Bundesnetzagentur (BNetzA) (Marktstammdatenregister (MaStR), Kraftwerksliste) und dem Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) geführt werden. Die KWK-Listen des LANUV zu den Erneuerbaren Energien bauen auf Daten des Marktstammdatenregisters sowie der Bezirksregierung Arnsberg (Grubengas) auf.

Im Marktstammdatenregister werden Stromerzeugungsanlagen aller Leistungsklassen geführt, die sich in Betrieb oder in einem fortgeschrittenen Planungsstadium befinden. Seit 2019 gibt es für Anlagenbetreiber eine Verpflichtung, ihre Anlagen in dieses Register einzutragen (MaStR-Verordnung). Zieltermin zur vollständigen Erfassung aller Anlagen im MaStR war der 31.01.2021, sodass davon ausgegangen werden musste, dass die zum Zeitpunkt der Erstellung des Status Quo genutzte Liste von April 2020 nicht alle bestehenden Anlagen erfasst.

Neben dem Marktstammdatenregister wird von der BNetzA eine Kraftwerksliste geführt, deren Daten im Zuge des Energiewirtschaftsgesetzes (§35 Monitoring und ergänzende Informationen) erhoben werden. In der Regel finden sich in diesen Listen Anlagen in der Leistungsklasse $> 10 \text{ MW}_{\text{el}}$. Eine Zusammenführung dieses Registers mit dem MaStR ist für die Zukunft geplant, bisher aber noch nicht umgesetzt worden. Zusätzlich erhebt auch das BAFA Daten zu KWK-Anlagen im Zuge der KWK-Förderung. Das BAFA ist die für Förderungen nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) zuständige Behörde. Für eine Förderung müssen Anlagenbetreiber entsprechende Meldungen zu ihren KWK-Anlagen durchführen.

Verarbeitung der Informationen

Die verfügbaren Listen sind sehr heterogen und mit jeweils unterschiedlich verwendeter Nomenklatur aufgebaut, u. a. der eingesetzten Energieträger und KWK-Technologien. Die Datenstruktur wurde daher zunächst vereinheitlicht, um im nächsten Schritt eine Zusammenführung aller Datensätze zu ermöglichen.

Anlagen, die ihren Standort nicht in NRW haben (fehlerhafte Einträge) oder nicht im KWK-Betrieb Strom erzeugen, wurden aussortiert. Zudem wurde der Betriebsstatus geprüft und auf

Basis eigener Erfahrungen ergänzt, da nicht alle Anlageneinträge hierzu Informationen enthielten. Bei den verbleibenden Anlagen mussten folgende Annahmen getroffen werden:

- Anlagen, die im MaStR geführt sind, befinden sich in Betrieb
- das (Wieder-)Aufnahme-Datum des Dauerbetriebs gibt Aufschluss über das Alter der KWK-Anlage und ist damit nach den Kriterien aus Tabelle 8 bewertet worden

Tabelle 8: Kriterien zur Festlegung des Betriebsstatus der KWK-Anlagen

Technologie	Leistungsklasse	max. Lebensdauer / Stichtag	Begründung
BHKW	Alle	12 Jahre / 01.01.2008	Generalüberholung fällig nach 40.000 – max. 80.000 Bh
unbekannt	< 1 MW _{el}	12 Jahre / 01.01.2008	Generalüberholung fällig nach 40.000 – max. 80.000 Bh
Alle Anlagen "ungleich BHKW"	< 10 MW _{el}	20 Jahre / 01.01.2000	Bei kleinen Anlagen < 10 MW _{el} (ungleich BHKW) wird von kürzeren Austauschraten ausgegangen als bei gleichem Anlagentyp größerer Leistung
Alle Anlagen "ungleich BHKW"	> 10 MW _{el}	30 Jahre / 01.01.1990	Bei größeren Anlagen (>MW _{el}) wird von längeren Austauschraten ausgegangen

Alle verbleibenden Datensätze wurden auch auf Doppelungen überprüft. Es wurde ein Abgleich von Anlagen nach Aufstellort (Ortsname bzw. Postleitzahl), elektrischer Leistung und Inbetriebnahmedatum durchgeführt. Waren alle Faktoren gleich, so wurden die Dubletten aus den Listen herausgefiltert. Bei Unklarheiten wurden weitere Faktoren verglichen, wie beispielsweise der Hauptenergieträger, der Anlagentyp oder der Betriebsstatus. Auch zum Teil vorliegende Bemerkungen zu den gelisteten Anlagen wurden berücksichtigt.

Im finalen Schritt erfolgte eine Prüfung auf Vollständigkeit und Plausibilität. Einzelne KWK-Anlagen wurden manuell ergänzt und Leistungsgrößen angepasst, da sie teilweise nicht der realen Betriebsleistung, sondern der theoretisch auskoppelbaren Leistung entsprachen.

Die in dieser Studie ermittelte Liste gibt eine sehr gute Übersicht über die KWK-Anlagen in NRW. Jedoch muss aufgrund vieler Korrektur- und Plausibilisierungsschritte von einer weiterhin nicht vollständigen Datenlage ausgegangen werden. Zum einen können einzelne Datensätze weiterhin fehlerhaft sein, zum anderen konnten nicht alle Datenlücken geschlossen werden.

2.4.2 Ergebnis

Im folgenden Teil werden die Ergebnisse der Datenerfassung dargestellt. Tabelle 9 führt den Status quo der in Betrieb befindlichen KWK-Anlagen nach eingesetzten Energieträgern auf.

Tabelle 9: KWK-Anlagen nach Energieträger im Ist-Stand

Energieträger	elektrische Leistung [MW]	thermische Leistung [MW]
Abfall	174	643
Biogas	320	318
Biomasse	107	201
Biomethan	19	17
Braunkohle	5.872	2.247
Deponiegas	4	6
Erdgas	5.668	6.158
Grubengas	65	5
Heizöl	245	664
Klärgas	259	997
Klärschlamm	5	4
Prozessdampf	12	70
Sonstige Energieträger	225	< 1
Sonstige Gase	254	361
Steinkohle	5.180	2.862
unbekannt	31	101
Summe	18.440	14.654

Geht man nach elektrischer Anlagenleistung, machen Braunkohle-gefeuerte KWK-Anlagen den größten Anteil unter allen KWK-Anlagen in NRW aus, gefolgt von Erdgas und Steinkohle. Erfolgt die Auswertung nach thermischer Leistung, haben jedoch Erdgas-gefeuerte KWK-Anlagen den größten Anteil (Abbildung 7).

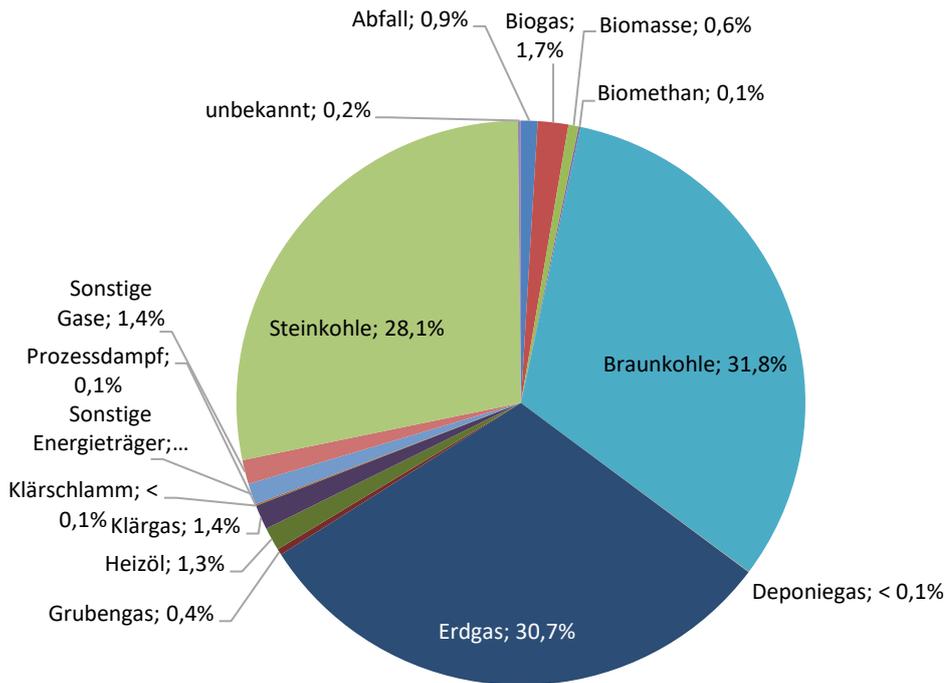


Abbildung 7: Anteil Energieträger der KWK-Anlagen in NRW – elektrische Leistung

Aus Tabelle 9 und Abbildung 7 lässt sich zudem erkennen, dass der Status quo der Energieträger, die momentan in NRW in KWK-Anlagen eingesetzt werden, einen hohen Anteil fossiler Brennstoffe aufweist. Ca. 90 % der elektrischen Leistung wird dabei den Brennstoffen Braunkohle, Steinkohle und Erdgas zugerechnet.

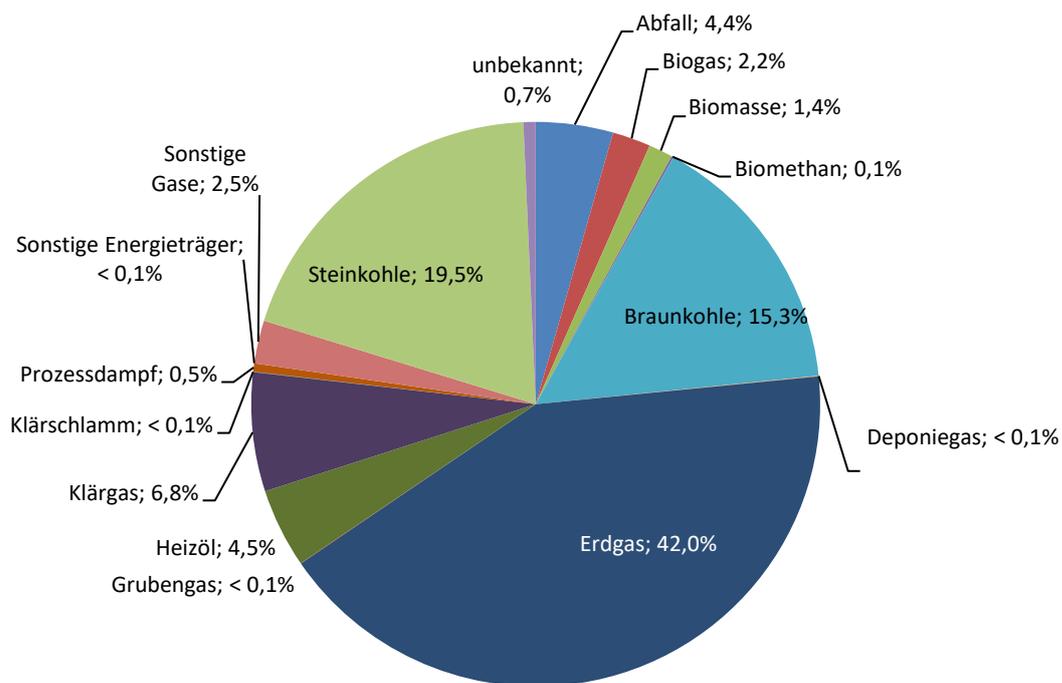


Abbildung 8: Anteil Energieträger der KWK-Anlagen in NRW – thermische Leistung

Abbildung 8 stellt ein entsprechend ähnliches Ergebnis dar, aufgeteilt allerdings nach der thermischen Leistung. Auffällig ist, dass der thermische Anteil der Energieträger Braunkohle und Steinkohle an der Summe der installierten Leistung geringer ist als der elektrische Anteil, was darin begründet ist, dass einige KWK-Anlagen nicht das komplette thermische Potenzial auskoppeln. Dies lässt sich aus eigenen Erfahrungen und aus der Recherche zu einzelnen Anlagen ableiten. Die in den Listen von BAFA und BNetzA angegebenen Leistungen für die Auskopplung von Wärme liegen teils deutlich unterhalb der technisch zu erwartenden Leistungen, wenn die technisch machbare Stromkennzahl als Referenz herangezogen wird. Andere Energieträger wie Abfall und Klärgas haben umgekehrt ein großes Verhältnis von thermischer zu elektrischer Leistung.

Bei den KWK-Technologien machen den größten Anteil an der Leistung Dampfturbinen-Heizkraftwerke aus, sowohl in der Auswertung nach elektrischer als auch nach thermischer Leistung. An zweiter Stelle folgen Gas- und Dampfkraftwerke (Tabelle 10).

Tabelle 10: Abgeleitete Stromkennzahlen der KWK-Anlagen

Stromkennzahl	elektrische Leistung	thermische Leistung	Stromkennzahl
	[MW]	[MW]	
BHKW	965	1.272	0,76
Brennstoffzelle	13	30	0,44
Dampfmotor	< 1	< 1	0,15
Dampfturbinen-HKW	11.917	7.639	1,56
Gasturbine	681	1.012	0,67
GuD	3.486	3.779	0,92
ORC	3	17	0,20
Sonstige	106	598	0,18
unbekannt	1.269	306	(4,15)
Summe	18.440	14.654	Ø 1,26

Der Anteil von Dampfturbinen-Heizkraftwerken beträgt knapp 65 %, sie finden insbesondere in den Stein- und Braunkohlekraftwerken Anwendung (Abbildung 9). Diese sind wiederum geprägt von einer hohen elektrischen Leistung je Kraftwerksblock. Die aggregierte elektrische Leistung der BHKW in NRW entspricht nur ca. 5 % der Gesamtleistung der KWK-Anlagen, wobei die Anzahl der BHKW an der Gesamtanzahl der KWK-Anlagen in NRW ca. 90 % entspricht (s. Tabelle 11).

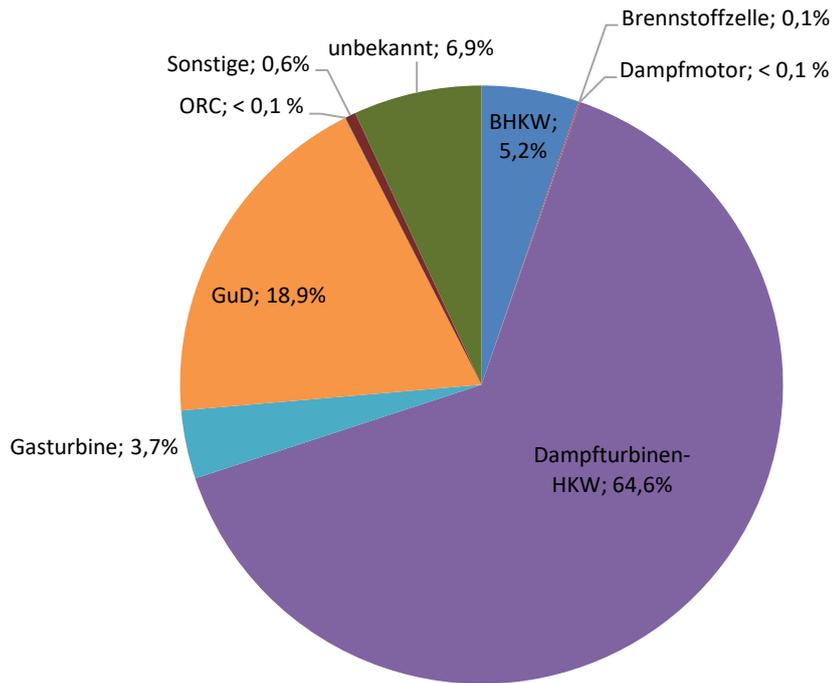


Abbildung 9: Anteil Technologien der KWK-Anlagen in NRW – elektrische Leistung

Wie auch bei der Auswertung der Energieträger, ist der thermische Leistungsanteil der Dampfturbinen-Heizkraftwerke (im Wesentlichen Stein- und Braunkohle) geringer als deren elektrischer Anteil (Abbildung 10).

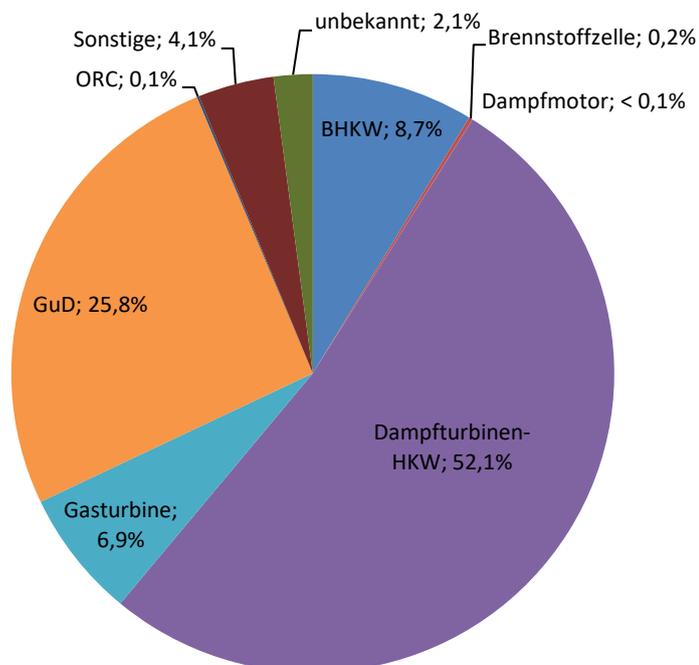


Abbildung 10: Anteil Technologien der KWK-Anlagen in NRW – thermische Leistung

Aus dem Verhältnis der elektrischen zur thermischen Leistung kann je Technologie die mittlere Stromkennzahl abgeleitet werden (Tabelle 10). Je geringer die Kennzahl ist, desto höher ist der Anteil der Wärmeerzeugung an der Gesamterzeugung von Wärme und Strom. Es ist ersichtlich, dass insbesondere Dampfturbinen-Heizkraftwerke eine sehr geringe thermische Leistung im Verhältnis zu deren elektrischer Leistung haben, was darauf hindeuten könnte, dass hier ein Potenzial für eine erhöhte Wärmeauskopplung besteht. Die über die aufsummierten elektrischen und thermischen Anlagenleistungen resultierende Stromkennzahl beträgt 1,26. Die elektrische Leistung der KWK-Anlagen in NRW ist dementsprechend höher als die thermische Leistung.

Bei der Gesamtanzahl der KWK-Anlagen dominieren die BHKW-Anlagen mit einer Vielzahl sehr kleiner Leistungseinheiten (Tabelle 11). Mit sehr großem Abstand folgen Dampfturbinen-Heizkraftwerke und Dampfmaschinen. GuD-Anlagen und Brennstoffzellen machen nur einen geringen Anteil an der Gesamtanzahl aus.

Tabelle 11: Anzahl der KWK-Anlagen in NRW nach Technologien

Anzahl	Anzahl	Anteil [%]
BHKW	9.674	91,9 %
Brennstoffzelle	22	0,2 %
Dampfmaschine	43	0,4 %
Dampfturbinen-HKW	128	1,2 %
Gasturbine	41	0,4 %
GuD	26	0,2 %
ORC	1	< 0,1 %
Sonstige	4	< 0,1 %
unbekannt	588	5,6 %
Summe	10.527	

Aus den oben beschriebenen Datengrundlagen ging zudem der Standort der KWK-Anlagen auf Ebene der Postleitzahlen hervor. Auf Grundlage der Angaben zur Postleitzahl war somit die Zuordnung zu einer Gemeinde möglich. Die folgenden drei Abbildungen zeigen die Anzahl der in Betrieb befindlichen KWK-Anlagen je Gemeinde (Abbildung 11) sowie deren thermische (Abbildung 12) und elektrische Leistung (Abbildung 13).

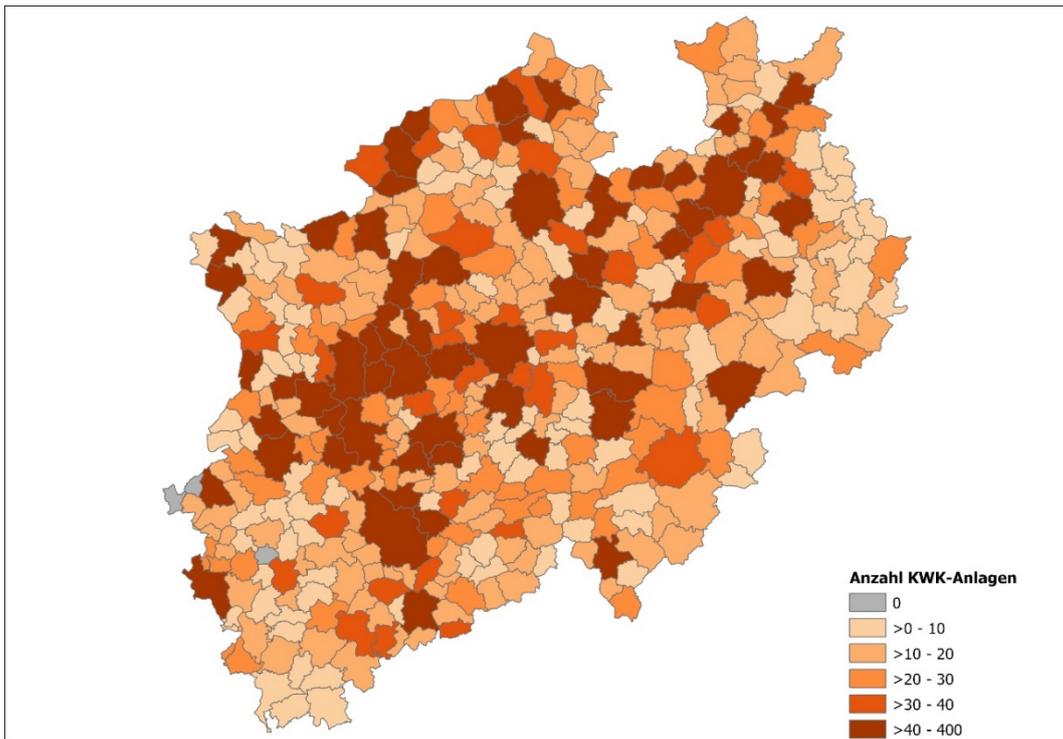


Abbildung 11: Anzahl KWK-Anlagen in NRW je Gemeinde

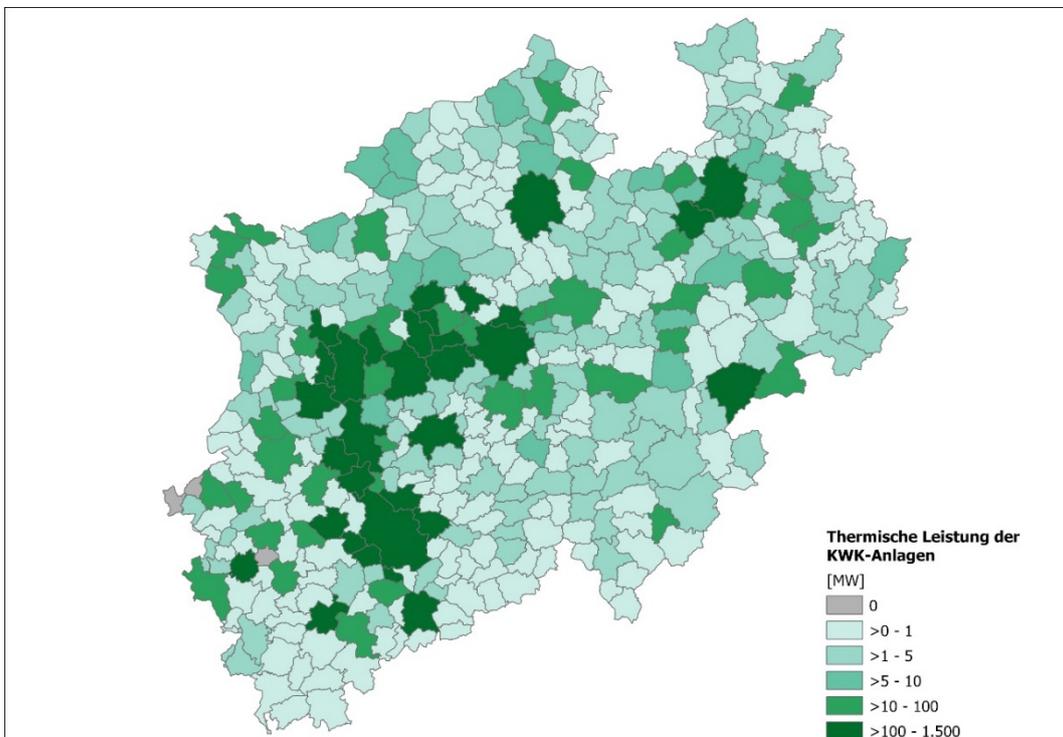


Abbildung 12: Thermische Leistung der KWK-Anlagen in NRW je Gemeinde

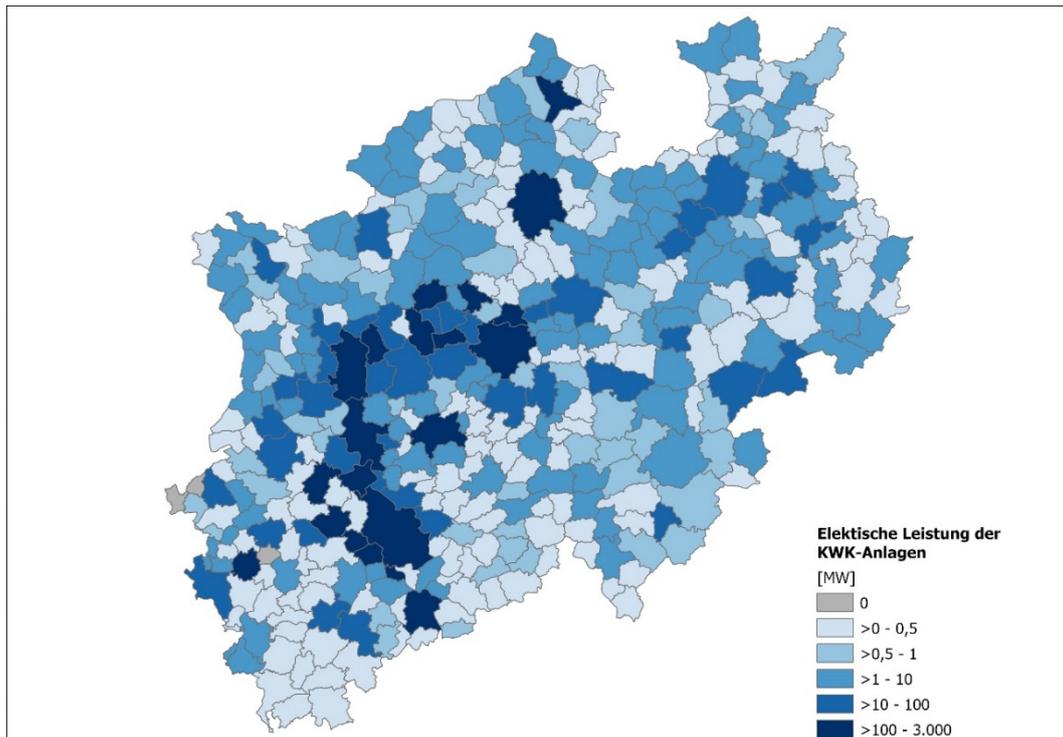


Abbildung 13: Elektrische Leistung der KWK-Anlagen in NRW je Gemeinde

Eine genauere Verortung war in den meisten Fällen nicht möglich, da die Adressen zum Teil aus Datenschutzgründen nicht angegeben waren. Es ist deutlich zu erkennen, dass insbesondere in den größeren Städten eine hohe thermische und elektrische Leistung installiert ist. Bei der Anzahl der KWK-Anlagen ist diese Tendenz nicht ganz so ausgeprägt, hier ist die Verteilung im Vergleich zur installierten Leistung etwas homogener.

2.5 Zusammenfassung

Um die KWK-Potenziale für die drei Stützjahre berechnen zu können, wurde zunächst als Ausgangspunkt der Ist-Stand der Wärme- und Kälteversorgung in NRW erhoben. Dabei wurde das vorhandene Raumwärmebedarfsmodell aktualisiert, die Wärmelinienichte für ganz NRW bestimmt und der Prozesswärmebedarf der Industrie mit einem Temperaturbedarf unter 500 °C ermittelt. Dieser wurde anschließend in vier Prozesswärme-Gruppen (PW-Gruppen) aufgeteilt, um die unterschiedlichen Wärmebedarfe bestmöglich berücksichtigen zu können. Zudem wurde der Raumkältebedarf näherungsweise ermittelt, differenziert zwischen dem Kältebedarf von Wohn- und Nichtwohngebäuden. Hierbei ist festzustellen, dass der Raumkältebedarf mit 2,8 TWh/a deutlich von den Nichtwohngebäuden dominiert wird, jedoch im Vergleich zum Gesamtwärmebedarf von 273 TWh/a (Raumwärme, Warmwasser, Prozesswärme) nur einen sehr geringen Anteil von knapp 1 % ausmacht.

Anschließend wurde die Datenlage zu den Wärmenetzen in NRW vorgestellt. Es konnte für die Bearbeitung der Studie ein Großteil der Wärmenetze in NRW verortet werden. Hierbei handelt es sich um insgesamt 221 Fernwärmenetze mit klarer räumlicher Verortung und zusätzlich 115 Netze, deren räumliche Ausbreitung abgeschätzt werden konnte. Somit konnten Informationen zu ca. 4.600 km Fernwärmenetzlänge in der Studie berücksichtigt werden. Anschließend wurden die Netze nach Typen kategorisiert.

Des Weiteren wurden Daten zum Ist-Stand der KWK-Anlagen in NRW recherchiert, vor allem über Listen des Marktstammdatenregisters, der Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur und der geförderten Anlagen des BAFA sowie LANUV-eigener Listen zu den Erneuerbaren Energien, wobei im Wesentlichen die verwendeten Brennstoffe und die elektrische und thermische Leistung der Anlagen erhoben wurden. Insgesamt beträgt die ermittelte elektrische Leistung 18,4 GW und die thermische Leistung 14,7 GW. Als Brennstoffe werden derzeit vor allem die fossilen Energieträger Braunkohle, Steinkohle und Erdgas eingesetzt.

3 Technische und strukturelle Rahmenbedingungen der Kraft-Wärme-Kopplung

Im folgenden Kapitel wird die Strom- und Wärmebereitstellung über die Kraft-Wärme-Kopplung näher vorgestellt. Dabei werden die unterschiedlichen Technologien kurz vorgestellt, die Rolle der klimafreundlicher KWK näher erläutert sowie die Chancen und Hemmnisse der KWK skizziert.

3.1 KWK-Anlagen

Die Kraft-Wärme-Kopplung ist ein Überbegriff für alle Technologien, die gleichzeitig Strom und Wärme erzeugen. Für die sechs gängigsten KWK-Technologien wurden daher Steckbriefe erstellt, welche die Charakteristika dieser Technologien beschreiben und eine Einordnung erlauben. In Tabelle 12 werden einzelne Merkmale der Technologien gegenübergestellt:

Tabelle 12: Ausgesuchte Kennzahlen der KWK-Technologien

KWK-Technologie	Leistungsbereich [MW _{el}]	Stromkennzahl	Temperatur-niveau	Regelbarkeit	WGK (heute)	Marktchance
BHKW	0,005 – 10	0,6 – 0,9	< 130 °C	+	+	+
Gasturbine + Abhitzekeessel	0,2 – 300	0,3 – 0,6	HW: < 200 °C, Dampf: < 550 °C	+	+	+
GuD	80 – 850	0,7 – 2,0		+	+	+
Dampfturbine	10 – 1.000	0,6 – 2,5		-	0	0
Brennstoffzelle	0,001 – 4	0,7 – 3,25	HW: < 150 °C Dampf: > 500 °C	++ (NT) + (HT)	--	0
ORC	0,1 – 10	0,1 – 0,25	70°C – 130°C	+	0	-

WGK: Wärmegestehungskosten

HW: Heißwasser

ORC: Organic Rankine Cycle

NT: Niedertemperatur

HT: Hochtemperatur

+(+): (stark) überdurchschnittlich

0: durchschnittlich

-(-): (stark) unterdurchschnittlich

nach [SCHAUMANN & SCHMITZ, 2010; PROGNOSES ET AL., 2019; ASUE, 2010; AMMERMAN ET AL., 2015; IEA, 2019; IZES, 2016; KURZWEIL, 2013; U.S. EIA, 2017; C.A.R.M.E.N., 2020; IZES, 2015 und eigenen Annahmen]

Die KWK-Technologien sind über einen großen Leistungsbereich und folglich sowohl in Nah- und Fernwärmenetzen, der Industrie als auch in der dezentralen Objektversorgung einsetzbar. Dabei eignen sich BHKW, Brennstoffzelle und ORC i.d.R. für kleine Leistungsbereiche, sind jedoch modular skalierbar. GuD-Kraftwerke sowie mit reinen Dampfturbinen betriebene Kohlekraftwerke stellen heute leistungsbezogen den überwiegenden Anteil des Kraftwerksparks dar. Brennstoffzellen können je nach Typ zur Niedertemperatur- und

Hochtemperatur-Wärmebereitstellung (NT bzw. HT) (inkl. Dampferzeugung) eingesetzt werden. Besonders die gasförmig betriebenen KWK-Anlagen (BHKW, GT, GuD, BZ) sind flexibel regelbar und daher komplementär zum steigenden Anteil fluktuierender, regenerativer Energien einsetzbar.

Alte kohlebetriebene Dampfturbinenkraftwerke weisen aufgrund steigender CO₂-Preise sinkende Einsatzzeiten auf und werden zunehmend aus dem Markt gedrängt und im Rahmen des beschlossenen Kohleausstiegs bis spätestens 2038 stillgelegt. Eine mögliche Nachnutzung stellt die Konversion des Energieträgers auf Abfall, Biomasse oder gasförmige Brennstoffe dar. Zudem ist eine Umnutzung auf „Überschussstrom“ durch Nachrüstung mit Power-to-Heat-Komponenten und Hochtemperaturspeicher (sog. Wärmespeicherkraftwerke) möglich [vgl. DLR, 2019]. Die zurzeit mit Erdgas betriebenen KWK-Anlagen können perspektivisch auf regenerative Brennstoffe (Biogas, Wasserstoff, synthetisches EE-Methan) umgestellt werden. Die Brennstoffzelle ist aufgrund der heutigen hohen Investitionskosten noch nicht wettbewerbsfähig. Falls die Produktionskosten künftig signifikant sinken, kann die KWK-Technologie aufgrund hoher elektrischer Wirkungsgrade und der optimalen Eignung für (perspektivisch grünen) Wasserstoff vermehrt im zukünftigen Energiesystem eingesetzt werden. Der Einsatz von ORC-Anlagen ist derzeit hingegen aufgrund geringer Stromkennzahlen lediglich in Bereichen mit preiswerten Abwärmequellen und ohne direkte Verwendung des Temperaturniveaus der Überschusswärme sinnvoll (kleine Biomasse-Anlagen, Abwärme).

3.2 Klimafreundliche KWK

Heutige KWK-Anlagen werden zum großen Teil mit fossilen Energieträgern (v.a. Erdgas und Kohle) betrieben. Während der Einsatz von kohlebasierten KWK-Anlagen rückläufig ist, wird erwartet, dass auch künftig gasbasierte KWK-Anlagen zur Bereitstellung der Residuallast zu Erneuerbaren Energien in der Stromerzeugung benötigt werden [IFAM, 2018]. Um eine klimaneutrale Wärmeversorgung bis 2050 zu erreichen, ist eine vermehrte Nutzung Erneuerbarer Energien ebenso wichtig wie der Ersatz fossiler durch synthetische Energieträger in KWK-Anlagen. Das Potenzial zur Substitution des fossilen Erdgases durch klimaschonenden Wasserstoff und darauf aufbauenden synthetischen Brennstoffen ist groß und vielfältig. Schon heute werden durch die Fördermaßnahme „innovative KWK-Systeme“ (iKWK) über das KWKG Systeme gefördert, die zusätzlich zu einer konventionellen KWK-Anlage einen Anteil von mindestens 30 % erneuerbare Wärme erzeugen.

Die Rolle der KWK im Energiesystem wird sich aufgrund der Klimaschutzziele zeitnah ändern. Als besonders hemmende Entwicklung wird – bei gleichzeitig zunehmender Elektrifizierung – die nötige Reduzierung des Wärmebedarfs für Gebäude und die Umstellung der Stromerzeugung auf Erneuerbare Energien angesehen. Dadurch werden die Einsatzmöglichkeiten der KWK sowohl auf der Wärme- als auch auf der Stromseite künftig eingeschränkt. Auf der anderen Seite entsteht aufgrund des fluktuierenden Charakters der EE-Stromerzeugung mehr Bedarf an regelbaren Kraftwerken, Speichern und Flexibilitätsoptionen. Zu dieser Bedarfsdeckung kann die flexible KWK auf Basis von synthetischen Gasen (Wasserstoff und synthetisches Methan) beitragen. Da der Wirkungsgrad bei der Herstellung von Wasserstoff besser ist als bei der Produktion von synthetischem Methan, wurde in dieser Studie der Energieträger Wasserstoff betrachtet.

Mit dem Ziel einer klimaneutralen Wärmeversorgung gibt es mehrere Arten, Wasserstoff herzustellen. Eine einfache Einordnung ist die Wasserstoff-Farbenlehre nach dem BMBF [BMBF, 2020]:

- Grauer Wasserstoff: aus Erdgas mittels Dampfreformierung (nicht klimaneutral, daher nur als Übergangstechnologie relevant, z. B. für einen schnellen Infrastrukturaufbau)
- Blauer Wasserstoff: aus Erdgas mittels Dampfreformierung plus Carbon Capture & Storage (CCS) (weitgehend klimaneutral, aber nur begrenzte Speicherpotenziale, daher nur als Übergangstechnologie relevant)
- Grüner Wasserstoff: hergestellt aus EE-Strom mittels Wasserelektrolyse oder aus Biomasse mittels Vergasung oder Fermentation (klimaneutral)
- Türkiser Wasserstoff: hergestellt aus Erdgas mittels Methanpyrolyse plus CCS (dabei entsteht kein CO₂ sondern fester Kohlenstoff, Verfahren noch im F&E-Stadium daher nicht kurz- bis mittelfristig einsetzbar)

Es gibt mehrere Einsatzmöglichkeiten für Wasserstoff in der Wärmeversorgung. Hierzu zählen im Bereich KWK wasserstoffbasierte Motor- und Turbinen-Anlagen sowie Brennstoffzellen, bei den Nicht-KWK-Technologien zudem z. B. wasserstoffbasierte Wärmepumpen, Heizkessel [vgl. BRÖTJE, 2019] oder die Nutzung von Abwärme aus Elektrolyseuren. Eine Beimischung von Wasserstoff im Erdgasnetz ist aktuell bis zu 10 Vol.-% möglich [DEUTSCHER BUNDESTAG, 2019], zukünftig ist jedoch deutlich mehr denkbar und notwendig, vor allem beim Bau neuer Leitungen. Das Land NRW fördert einen zügigen Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur und hat mit der Wasserstoff-Roadmap ein klares Ziel für die Wasserstoffversorgung bis 2050 [MWIDE, 2020]. Zwar wird der Großteil des Wasserstoffbedarfs in der Industrie und im Verkehr erwartet, jedoch kann auch die Wärmeversorgung durch die künftig vorhandene Infrastruktur profitieren.

3.3 Chancen und Hemmnisse der KWK im Kontext der Energiewende

Aufbauend auf den zuvor erarbeiteten Steckbriefen und den Ausführungen zur klimaneutralen KWK, wurden die besonderen Stärken und Schwächen sowie Chancen und Risiken bzw. Hemmnisse der KWK-Technologien analysiert. Zur Beurteilung wird nachfolgend eine Auswahl von Kriterien zitiert, die im Rahmen des KoVI-SGW-Projektes entwickelt wurden [WUPPERTAL INSTITUT, 2021B]. Die Vor- und Nachteile bzw. Stärken und Schwächen von KWK-Technologien wurden dabei im Vergleich zu anderen effizienten oder erneuerbaren Wärmeversorgungstechnologien betrachtet:

- Power-to-Heat
 - a) direktelektrisch (Elektrokessel oder Elektrodenkessel)
 - b) mit Wärmepumpe
- Tiefe Geothermie (> 400 m, i.d.R. ohne WP)
- Bioenergie (Biomasse/Biogas mit oder ohne KWK)
- Abwärme (industriell und kommunal)
- Solarthermie (Gebäude und Freifläche)

Die Potenziale, die sich durch die Kombination konventioneller KWK-Technologien mit innovativen Komponenten ergeben, werden in der Folge qualitativ aufgezeigt.

3.3.1 Multikriterielle Bewertung

Insgesamt wurden 13 Kriterien für die Einordnung und qualitative Bewertung der KWK im Vergleich zu den zuvor genannten alternativen Wärmeversorgungssystemen herangezogen:

1. Leistungsbereich (thermisch)
2. Temperaturniveau
3. Anwendungsbereich
4. Einsatzbereich
5. Spezifische Kosten der Wärmeerzeugung
6. Dekarbonisierungspotenzial
7. Beitrag zur Energieeffizienz
8. Regelbarkeit und Flexibilisierungspotenzial
9. Infrastrukturbedarf
10. Lokale Verfügbarkeit und Flächenbedarf
11. Pfadabhängigkeiten (Lock-in-Risiko) im Sinne des Klimaschutzes bzw. der THG-Neutralität
12. Co-Benefits, Synergien und Optionen zur Sektorkopplung
13. Gesellschaftliche & Markt-Akzeptanz

Die ersten fünf Kriterien wurden rein quantitativ beschrieben, sodass hier eine Bandbreite von Zahlen und Daten aufgeführt werden kann (Tabelle 13):

Tabelle 13: Bewertung der KWK im Vergleich zu anderen innovativen Wärmeversorgungsoptionen (quantitativ)

KRITERIUM	0 KWK Motor-BHKW / GuD/GT/DT/BZ	1a PtH Direktelektrisch (Kessel)	1b PtH mit Wärmepumpe	2 Geothermie tief (> 400 m, i.d.R. ohne WP)	3 Bioenergie Biomasse / Biogas	4 Abwärme industriell / kommunal	5 Solarthermie Gebäude / Freifläche
1 Leistungsbereich (thermisch)	ca. 1 kW (kleine Brennstoffzelle) bis ca. 500 MW (große GuD-Anlage)	Elektrokessel: ca. 100 kW – 15 MW Elektrodenkessel: ca. 1 – 90 MW	ca. 1,5 kW (WW-Bereitung) bis ca. 10 MW (FW-Netz, ggf.)	ca. 100 kW bis ca. 30 MW (in Deutschland)	ca. 10 kW (Pelletofen) bis ca. 500 MW (Biomasse- Heizkraftwerk)	einige 100 kW bis mehrere MW	ab ca. 4 kW (Gebäude) bis ca. 100 kW - 50 MW (Solare FW)
2 Temperaturniveau	ca. 80°C bis mehrere 100°C	bis mehrere 100°C	ca. 30°C bis ca. 150°C	ca. 40°C bis mehrere 100°C	bis mehrere 100°C	10 bis 15°C (kommunal) bis > 150°C (Industrie)	ca. 60°C bis 110°C
3 Anwendung	Objektversorgung Wärmenetze Industrie	Wärmenetze Industrie	Objektversorgung Wärmenetze Industrie	Wärmenetze Industrie	Objektversorgung Wärmenetze Industrie	Wärmenetze Industrie	Objektversorgung Wärmenetze Industrie
4 Einsatzbereich	Grundlast, Residuallast	Spitzenlast	Grundlast	Grundlast	Grundlast, Spitzenlast/Backup	Grundlast	Grundlast
5 Spez. Kosten (pro kW_{th}): a) Investition b) Energiekosten	a) mittel bis hoch b) mittel	a) niedrig b) hoch (Strom)	a) mittel b) mittel (Strom, Umweltwärme)	a) hoch (Bohrung) b) niedrig (Eigenstrom Pumpen)	a) niedrig bis mittel b) niedrig (feste Biomasse) bis mittel (Biogas)	a) individuell abhängig von Komplexität und Infrastruktur b) niedrig (Eigenstrom Pumpen)	a) mittel bis hoch b) niedrig (Eigenstrom Pumpen)

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf [WUPPERTAL INSTITUT, 2021B]

Tabelle 14: Bewertung der KWK im Vergleich zu anderen innovativen Wärmeversorgungsoptionen (qualitativ)

KRITERIUM		0 KWK Motor-BHKW / GuD/GT/DT/BZ	1a Pth Direktelektrisch (Kessel)	1b Pth mit Wärmepumpe	2 Geothermie tief (> 400 m, i.d.R. ohne WP)	3 Bioenergie Biomasse / Biogas	4 Abwärme industriell / kommunal	5 Solarthermie Gebäude / Freifläche
6	Dekarbonisierungspotenzial	++ bis o	+	++	++	++ bis o	++ bis o	++ bis o
7	Beitrag zur Energieeffizienz	++ bis +	+ bis - -	++ bis +	++	++ bis o	++	++
8	Regelbarkeit und Flexibilisierungspotenzial	++ bis +	++	+	o	+ bis o	o	-
9	Infrastrukturbedarf (Netze)	+ bis -	o	o	o	+ bis -	o	+ bis -
10	Lokale Verfügbarkeit und Flächenbedarf (für EE)	- -	++ bis -	++ bis +	++ bis o	++ bis - -	++	++ bis o
11	Pfadabhängigkeiten im Sinne der Klimaneutralität	+ bis -	+ bis - -	+ bis o	++	o	o	++
12	Co-Benefits, Optionen für Sektorkopplung	+	+	+	+	+	+	+
13	Akzeptanz (gesellschaftlich und am Markt)	++ bis o	+ bis o	++ bis o	+ bis -	+ bis -	++ bis +	++ bis o

Von sehr positiv (++) bis sehr negativ (-)

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf [WUPPERTAL INSTITUT, 2021B]

Die Bewertung zeigt, dass viele Kriterien durch alle Technologien abgebildet werden. Während beim Leistungsbereich lediglich die Bioenergie im Vergleich zur KWK auch sehr hohe Leistungen abrufen kann, ist es beim maximalen Temperaturniveau der direktelektrische Kessel, der sehr hohe Temperaturen weit über 150 °C schafft. Alle anderen Technologien bewegen sich eher im unteren bis mittleren Leistungs- bzw. Temperaturbereich. Bei den Anwendungsoptionen ist nicht jede Technologie für eine Objektversorgung geeignet, da sich beispielsweise die Tiefe Geothermie erst bei einer sehr hohen Wärmeabnahme lohnt. Auch bei den Investitions- und Betriebskosten gibt es große Unterschiede.

Bei den Kriterien 6 bis 13 wurde eine qualitative Bewertung in einem fünfstufigen System von „sehr positiv“ (bzw. Grad der Erfüllung „sehr hoch“) bis „sehr negativ“ (bzw. Grad der Erfüllung „sehr niedrig“) vorgenommen (Tabelle 14).

Die hier vorgenommene Analyse zeigt, dass die KWK überwiegend – in fünf von acht der hier betrachteten qualitativen Kriterien (K 6 bis K 13) – neutral, positiv oder sehr positiv abschneidet. In zwei weiteren Kategorien (K 9 Infrastruktur und K 11 Pfadabhängigkeit) ist je nach Anwendung auch eine negative Bewertung möglich wie z. B. die Abhängigkeit von der Gasnetzstruktur. Der größte Schwachpunkt der KWK liegt in dem hohen Flächenbedarf für die Erzeugung der benötigten erneuerbaren, synthetischen oder biomassebasierten Energieträger im Vergleich zu anderen erneuerbaren Wärmequellen wie die Solarthermie, Geothermie oder PtH. Die einzigen beiden Technologien ohne negative Bewertung innerhalb der Kriterien ist die Wärmeerzeugung mittels Wärmepumpen sowie die Nutzung der Abwärme.

Die multikriterielle Analyse lieferte im Rahmen dieser Studie für die Beurteilung von KWK- und Nicht-KWK-Wärmeerzeugern wertvolle Hinweise, da, je nachdem welche Gewichtung ein Kriterium bei der Technologieauswahl erfährt, die Stärken und Schwächen der Technologie übergreifend dargestellt wurden.

3.3.2 SWOT-Analyse

Die SWOT-Analyse ist ein Tool der Strategieentwicklung, das die Kategorien Strengths (Stärken), Weaknesses (Schwächen), Opportunities (Chancen) und Threats (Risiken) eines Untersuchungsobjekts betrachtet. Dieses Werkzeug soll dabei helfen, die Komplexität bei der Entscheidungsfindung für ein zukunftsfähiges Wärmeversorgungskonzept zu reduzieren. Das Ziel der im Rahmen des Projektes durchgeführten SWOT-Analyse war es, die Rolle der Kraft-Wärme-Kopplung in Bezug auf die Energiewende anhand künftiger gesellschafts- und energiepolitischen Herausforderungen zu bewerten [ANGERMEIER, 2016].

Tabelle 15 fasst die grundlegenden Stärken/Schwächen- und Chancen/Risiken-Analyse für die Kraft-Wärme-Kopplung in der Gesamtheit der Technologien Motor-BHVK, GuD-Anlage, Gasturbine, Dampfturbine und Brennstoffzelle im Kontext der Energiewende zusammen. Wie auch schon die multikriterielle Bewertung gab die SWOT-Analyse wichtige Hinweise für die weitergehende Analyse.

Tabelle 15: SWOT-Analyse für die zukünftige Rolle der KWK

	STÄRKEN	SCHWÄCHEN
INTERNE FAKTOREN	<ul style="list-style-type: none"> • Hocheffizienztechnologie (Abwärmenutzung, Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung) in sehr breitem Leistungs- und Anwendungsbereich • Technologievielfalt (Motor-BHKW, GT, DT, GuD, BZ, ORC) und gute Kombinierbarkeit mit anderen Wärmeversorgungsoptionen (insbesondere PtH, Bioenergie, Solarenergie) • Beitrag zu gesicherten Erzeugungskapazitäten (hohe Flexibilität, Bereitstellung von positiver und negativer Regelleistung) • Technisches Potenzial zur Umstellung von fossilen auf erneuerbare Gase (Biogas, Biomethan, EE-Wasserstoff und EE-Methan) und Festbrennstoffe (feste Biomasse) • Zunehmende Marktreife von Brennstoffzellen als Technologie mit hoher Stromkennzahl und direkter Verwertung von Wasserstoff 	<ul style="list-style-type: none"> • In der Vergangenheit und gegenwärtig überwiegend auf fossile Brennstoffe angewiesen • Verbrennungstechnologien (insbesondere Motor-BHKW) mit Nachteilen bezüglich Lärm, Vibrationen, Schadstoffausstoß, Wartungsaufwand, Lebensdauer und Methanschluß (THG)
EXTERNE FAKTOREN	<ul style="list-style-type: none"> • Zunehmender Bedarf an regelbaren Kraftwerken und Flexibilisierungsoptionen • Verbleibender Wärmebedarf für Raum- und Prozesswärme, die nicht durch Alternativen gedeckt werden können (insbesondere im Winter) • Erhöhtes Potenzial und Wirtschaftlichkeit für KWKK durch die steigende Hitzebelastung (Klimawandel) • Umstellung der Gasversorgung (Erzeugung und Gasinfrastruktur) auf Biomethan, EE-Wasserstoff und EE-Methan • Importe von EE-Gasen aus Ländern mit kostengünstigeren EE-Stromerzeugungspotenzialen • Synergetische Nutzung von Wasserstoffleitungen in der Industrie • Nutzung bestehender Kraftwerksstandorte für erneuerbare Wärmespeicherkraftwerke 	<ul style="list-style-type: none"> • Perspektivisch kein Einsatz mehr von fossilen Energieträgern • Wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit erschwert durch: <ul style="list-style-type: none"> ○ teurere, CO₂-arme Energieträger (Wasserstoff, SNG) ○ Hohe Kostensenkungspotenziale bei erneuerbaren Alternativtechnologien ○ Sinkende Refinanzierungsspielräume auf der Stromseite durch zunehmend günstigen EE-Strom in der Grundlast • Unsicherheit über neue Gasversorgung (Wasserstoff-Infrastruktur und Potenziale von EE-Wasserstoff bzw. -Methan) • Wegfall von Kuppelgasen für Industrie-KWK durch neue Verfahren in der Stahlproduktion • Erhöhte Nutzungskonkurrenz bzgl. Wasserstoff als Brennstoff durch erheblich steigenden Wasserstoff-Bedarf in der Industrie und im Verkehr • Unsichere und komplexe energiepolitische Rahmenbedingungen (KWKG und Ausschreibungen, EEG-Umlage, Stromsteuer, CO₂-Preis, ETS,...)

Obwohl die Stärken der KWK wie die Hocheffizienztechnologie in vielfältiger Ausprägung, gesicherte Erzeugung und technisches Umstellungspotenzial auf erneuerbare Energieträger die Schwächen überwiegen, ergeben sich auf der Risiko-Seite große Unwägbarkeiten. Diese sind vorwiegend in dem notwendigen Wandel der bestehenden Geschäftsmodelle zu sehen, die bisher überwiegend auf günstigen fossilen Brennstoffen wie Kohle und Erdgas basierten. Damit verbunden sind Unsicherheiten bezüglich der Kosten, Potenziale, Verfügbarkeit und des Infrastrukturaufbaus zur Erschließung von erneuerbaren Energieträgern – insbesondere Synthesegasen – als Ersatz für die fossilen Brennstoffe. Gleichzeitig wächst die Marktreife und damit die ökonomische Wettbewerbsfähigkeit konkurrierender, auf erneuerbaren Energieträgern basierender Nicht-KWK-Technologien wie beispielsweise Wärmepumpen, Solarthermie oder Geothermie.

Auch auf der Stromseite geraten KWK-Anlagen angesichts des Ausbaus von erneuerbaren Stromerzeugungsanlagen zunehmend ökonomisch unter Druck. Große Chancen bestehen hingegen bei der Bereitstellung gesicherter Leistung (Residuallast), die insbesondere angesichts des politisch beschlossenen gleichzeitigen Ausstiegs aus der Kernenergie und der Steinkohle an Bedeutung gewinnen wird. Ferner können gewisse Synergie-Anwendungen vorteilhaft werden, wie beispielsweise die hybride Bereitstellung von Wärme aus kombinierten KWK- und PtH-Anlagen, aus KWK mit Solarthermie-Unterstützung oder aus KWK-Niedertemperatur-Abwärme, die mit Hilfe von Wärmepumpen wieder auf ein nutzbares Temperaturniveau gebracht werden kann.

3.4 Zusammenfassung

Es wurden im Rahmen dieser Studie für sechs unterschiedliche KWK-Technologien (Blockheizkraftwerke (BHKW), Gasturbinen mit Abhitzeessel, Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerke (GuD), Dampfturbinen, Brennstoffzellen und Organic Rankine Cycle (ORC)) Steckbriefe erstellt und auf Basis unterschiedlicher Kriterien ausgewertet. Für die KWK-Technologien wurde eine multikriterielle Technikbewertung durchgeführt, wobei als Vergleichstechnologien besonders effiziente oder erneuerbare Wärmeversorgungstechnologien herangezogen wurden.

Es konnte gezeigt werden, dass die KWK in mehreren Kriterien neutral bis sehr positiv abschneidet. Es sind jedoch Pfadabhängigkeiten möglich und auch die Infrastruktur muss zur Anwendung passen. Als Hauptnachteil wurde der hohe Flächenbedarf festgestellt, der für die Erzeugung erneuerbarer synthetischer oder biomassebasierter Energieträger im Vergleich zu anderen erneuerbaren Wärmequellen wie Solarthermie, Geothermie oder PtH erforderlich ist.

Anschließend wurde eine SWOT-Analyse der KWK-Technologien durchgeführt. Diesen konnten eindeutige Stärken wie Hocheffizienz, Technologievielfalt, gesicherte Erzeugung und das Umstellungspotenzial auf Erneuerbare Energien zugewiesen werden. Es wurden jedoch auch erhebliche Risiken identifiziert. Geschäftsmodelle der KWK basieren bisher auf günstigen fossilen Energieträgern, der Einfluss des Infrastrukturumbaus und steigender Anteile Erneuerbarer Energien ist ungewiss. Außerdem konnte ein stark wachsender Markt erneuerbarer Technologien ohne KWK festgestellt werden. Hier wurden Synergieeffekte als mögliche Lösung vorgeschlagen, also die Kombination von KWK und erneuerbaren Technologien. Aufgrund des Wandels im Strommarkt wurde zudem ein starker preislicher

Druck festgestellt. Große Chancen werden hingegen in der Flexibilität und Regelbarkeit gesehen.

Die Rolle der KWK im Energiesystem wird sich aufgrund der Klimaschutzziele zeitnah ändern, sodass klimafreundliche KWK eine immer größere Rolle einnehmen wird. Es wird aufgrund des fluktuierenden Charakters der EE-Stromerzeugung mehr Bedarf an regelbaren Kraftwerken, Speichern und Flexibilitätsoptionen entstehen. Zu dieser Bedarfsdeckung kann die flexible KWK auf Basis von synthetischen Gasen (Wasserstoff und synthetisches Methan) beitragen.

4 Szenarien und Rahmenbedingungen

Im folgenden Kapitel werden die betrachteten Szenarien bis zum Jahr 2050 vorgestellt und die angenommenen Rahmenbedingungen sowie zugrunde gelegte Daten und Annahmen detailliert dargelegt. Alle diese Werte dienen als Grundlage für die Bewertung der KWK-Potenziale.

4.1 Szenarienbetrachtung

In dieser Studie wurden drei unterschiedliche Szenarien für die Stützjahre 2030, 2040 und 2050 betrachtet. So wurden die Potenziale für ein Referenz- (Ref) (anschließend nicht weiter berücksichtigt), ein 80 %- und ein Klimaneutral-Szenario (Kn) ermittelt. Abbildung 14 zeigt schematisch das jeweils noch vorhandene CO₂-Budget für das 80 %- und das Klimaneutral-Szenario. Während das 80 %-Szenario eher als Vergleich herangezogen wurde, hat aufgrund der Klimaschutzziele der Landesregierung in NRW das Klimaneutral-Szenario die höchste Relevanz für die Ergebnisse.

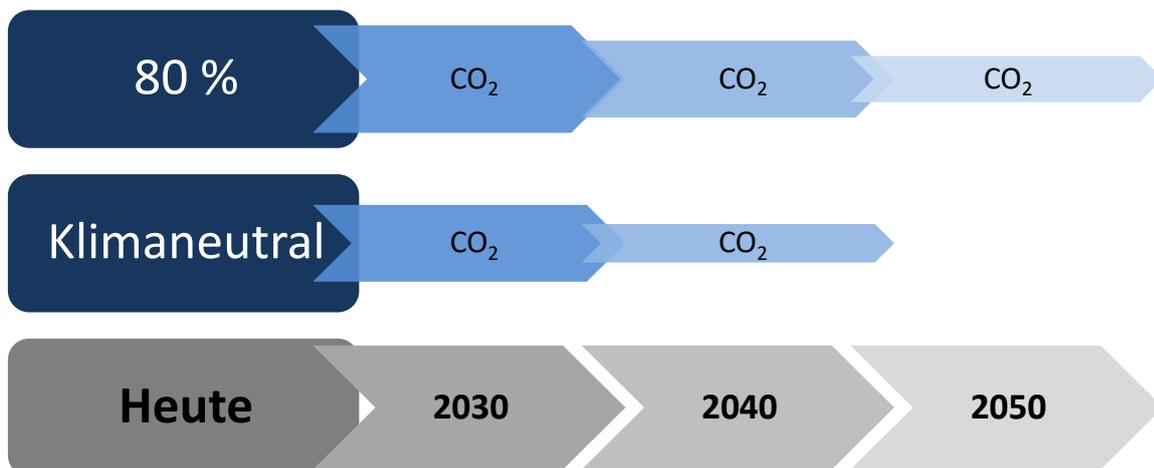


Abbildung 14: Betrachtete Szenarien und deren CO₂-Budget im zeitlichen Verlauf

Die in dieser Studie verwendeten Rahmenbedingungen und Annahmen basieren im Wesentlichen auf dem vom Wuppertal Institut entwickelten Modellsystem WISEE (Wuppertal Institute System Model Architecture for Energy and Emission Scenarios [WUPPERTAL INSTITUT, 2021A]). Darin werden alle treibhausgasrelevanten Sektoren der Energienachfrage und des Energieangebots für NRW, Deutschland und der angrenzenden Länder gebündelt. Das Modul HEAT ist ein Teil des WISEE-Modells und dient der Projektion, Bilanzierung und dem Monitoring von Energie und Emissionen im Gebäudesektor. Einige der Modellierungen zu den Szenarien waren nicht Bestandteil dieses Projekts, sondern wurden in einem parallel verlaufenden Projekt seitens des Wuppertal Instituts erarbeitet und in dieser Studie verwendet. Zudem wurde auf weiteren Studien aufgebaut, beispielsweise dem BDI-Szenario „Klimapfade für Deutschland“ der Boston Consulting Group (BCG) und Prognos [BCG & PROGNOSES, 2018]. Darüber hinaus wurden eigene Annahmen und Berechnungen zur Vervollständigung der Randbedingungen getroffen, die für die Ermittlung der Potenziale benötigt wurden. Die

entwickelten Szenarien sind dabei eingebettet in nationale, europäische und landesspezifische Ziele und Rahmenbedingungen.

Die in dieser Studie verwendeten Szenarien umfassen die fünf Sektoren Gebäude, Verkehr, Energiewirtschaft, Industrie und Landwirtschaft. Vertieft betrachtet wurde dabei insbesondere die Entwicklung folgender Aspekte, welche jedoch in unterschiedlicher Detailtiefe für die Bearbeitung dieser Studie relevant waren. Auf die Aspekte wird für das Klimaneutral-Szenario im Kapitel 4.3 vertieft eingegangen:

1. CO₂- und Energiepreise
2. Soziodemografie und Wirtschaft (keine szenariospezifische Unterscheidung)
3. Gebäudesektor (Bestand und Neubau, Sanierung, Heizungssysteme)
4. Änderung der Fahrzeugflotten im Verkehrssektor
5. Strommarkt (inkl. KWK)
6. Energieintensive Industrie
7. Wasserstoffversorgung

4.2 Referenz- und 80 %-Szenario

Im Referenz-Szenario wurden die zu Beginn der Bearbeitung der Studie bestehenden Anstrengungen bis 2050 für Deutschland und NRW auf Basis der Entwicklungen in den einzelnen Sektoren in den letzten Jahren und basierend auf historischen Trends fortgeschrieben. Dabei wurde die Implementierung weitergehender Klimaschutzmaßnahmen oder -strategien ausgeschlossen. Strukturell lehnt es sich an das Referenzszenario der Studie Klimapfade für Deutschland des BDI an [BCG & PROGNOSE, 2018] an.

Das 80 %-Szenario basiert auf Modellrechnungen des Wuppertal Instituts und beschreibt einen Minderungspfad, in dem die THG-Emissionen in NRW und Deutschland im Jahr 2050 um 80 % gegenüber 1990 gemindert sind. Bis Ende des Jahres 2020 war das 80 %-Reduktionsziel noch das angestrebte Klimaschutzziel des Landes NRW, welches im Klimaschutzplan aus dem Jahr 2013 festgelegt wurde [LANDTAG NRW, 2013]. Während ein solches Szenario bis vor wenigen Jahren als ambitioniert galt, ist es aus heutiger Sicht ebenso wie das Referenz-Szenario in seinem Ambitionsniveau überholt. Sowohl auf nationaler [BUNDESREGIERUNG, 2019] als auch auf europäischer [EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2020] und auf Landesebene [LANDESREGIERUNG NRW, 2020] wurde das Ziel der Klimaneutralität bis spätestens 2050 festgelegt, zuletzt sogar zeitlich verschärft auf 2045 [BUNDESREGIERUNG, 2021]. Das 80 %-Szenario ist dennoch geeignet, um in der Analyse eventuelle Lock-In-Effekte gegenüber dem Klimaneutral-Szenario aufzuzeigen und dient daher weiterhin als Grundlage, um einen Vergleich mit diesem vornehmen zu können.

Da sich während der Bearbeitungszeit der Studie die Klimaschutzziele des Bundes und des Landes wie oben beschrieben deutlich verschärft haben, hat das Referenz-Szenario bei der Analyse der Daten keine Relevanz mehr. Im Folgendem wird daher das 80 %-Szenario als maßgebliches Vergleichs-Szenario herangezogen und das Referenz-Szenario nicht weiter betrachtet.

4.3 Klimaneutrales Szenario

Das Klimaneutral-Szenario (Kn) orientiert sich an dem nationalen und europäischen Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2050 zur Einhaltung der Klimaschutzziele von Paris 2015 und weist die mögliche Rolle von NRW in diesem Umfeld aus. In Tabelle 16 werden wichtige Hauptmerkmale des Klimaneutral-Szenarios dargestellt und mit Merkmalen des 80 %-Szenarios verglichen.

Tabelle 16: Gegenüberstellung wichtiger Hauptmerkmale der Szenarien 80 % und Kn für 2050

Parameter	Szenario 80 %	Szenario Kn
Energieintensität/ Entwicklung Industrie	<ul style="list-style-type: none"> Industrie-Sektor in NRW bleibt relevant, Grundstoffindustrien wachsen weiter wie bisher. Raffinerieproduktion ist rückläufig, aber weiterhin Produktion auf Basis von Erdöl. ETS wirkt stark in Richtung Effizienzsteigerung und Energieträgershift, wenig Anreize und Investitionssicherheit, um in neue THG-neutrale Technologien zu investieren. 	<ul style="list-style-type: none"> Industrie-Sektor in NRW bleibt relevant, Grundstoffindustrien wachsen weiter wie bisher. Keine Raffinerieproduktion mehr auf Basis von Erdöl Vollständig erneuerbare Energieversorgung der Industrie. Die EU-Industrie wird vor Carbon Leakage (Verlagerung der Emissionen) wirksam geschützt.
Treibhausgas- reduktion (ggü. 1990)	<ul style="list-style-type: none"> 80 % 	<ul style="list-style-type: none"> 100 % („Netto-Klimaneutralität“, jedoch keine vollständige inländische Kompensation von Nicht-CO₂-Emissionen aus Landwirtschaft und Landnutzung)
Carbon Capture and Storage (CCS)	<ul style="list-style-type: none"> kein CCS 	<ul style="list-style-type: none"> CCS für prozessbedingte Emissionen der Industrie (z. B. Zement)
Fokus Energie- träger für Wärme- versorgung der Industrie	<ul style="list-style-type: none"> Erdgas 	<ul style="list-style-type: none"> Regionaler und Import-Wasserstoff Strom Biogas (in Regionen mit hohem Aufkommen)
Technologiefokus zur Wärme- versorgung	<ul style="list-style-type: none"> <u>Gebäude (Objektversorgung):</u> Sanierung von Heizungsanlagen und Ersatz von Öl durch regenerative Energieträger. <u>Zentrale Versorgung (Fernwärme):</u> Fokus auf Erdgas-KWK 	<ul style="list-style-type: none"> <u>Gebäude (Objektversorgung):</u> elektrische Wärmepumpe oder Nahwärmenetze. <u>Zentrale Versorgung (Fernwärme):</u> PtH, KWK-Ausbau orientiert sich am Wärmebedarf, Einsatzzeiten (Volllaststunden) nehmen ab, KWK-Betrieb mit Wasserstoff
Anteil EE an Stromerzeugung	<ul style="list-style-type: none"> ca. 90 % 	<ul style="list-style-type: none"> 100 %
Kohleausstieg	<ul style="list-style-type: none"> erfolgt spätestens 2035/2038 	

Wie oben erwähnt wurde die Erreichung der nationalen Ziele mittlerweile auf 2045 verlegt, jedoch waren die Ergebnisse dieser Studie zu diesem Zeitpunkt bereits berechnet. Dementsprechend gilt im Rahmen dieser Studie weiterhin das Zieljahr 2050. Im Folgenden werden die oben genannten 7 Aspekte näher beschrieben.

1. CO₂- und Energiepreise

Sowohl bei den Energie- als auch bei den CO₂-Preisen orientieren sich die Werte an den Szenarien des World Energy Outlook, kurz WEO 2018 [IEA, 2018]. Die Preise entsprechen der volkswirtschaftlichen Sicht und sind zunächst als reine Energie-(Börsen-)preise zu verstehen. Die betriebswirtschaftliche Sicht mit Berücksichtigung von Netzentgelten, Steuern und Umlagen als tatsächliche Eingangsgröße der Zielsysteme wird in Kapitel 4.9 dargestellt. Die angenommene Entwicklung der Preise spiegelt die Erwartungshaltung wider, dass mit steigendem Anspruch an den Klimaschutz weniger Verknappung eintritt und somit die fossilen Energieträger billiger werden. Tabelle 17 zeigt die angenommenen Preise des Klimaneutral-Szenarios im Vergleich zum 80 %-Szenario.

Tabelle 17: Gegenüberstellung der CO₂- und Energiepreise der Szenarien 80 % und Kn für 2050

Parameter	Szenario 80 %	Szenario Kn
CO ₂ -Preis	49 €/t (≈ 9,9 €/MWh für Erdgas)	171 €/t (≈ 34,4 €/MWh für Erdgas)
Erdgas-Preis	30 €/MWh (≈ 40 €/MWh incl. CO ₂ -Preis)	24 €/MWh (≈ 58 €/MWh incl. CO ₂ -Preis)
Wasserstoff-Preis (aus Erneuerbaren Energien inkl. Transport)	83 bis 130 €/MWh (Inland) und 88 bis 151 €/MWh (Import) 2,8 bis 4,3 €/kg (Inland) und 2,9 bis 5,0 €/kg (Import) (eher am oberen Ende der Spanne)	 (eher am unteren Ende der Spanne)
Strompreis	Strompreisunterschiede über das Jahr sind weniger stark ausgeprägt als im Kn-Szenario, leistungsabhängige Preis-Komponente höher als heute, aber geringer als im Kn-Szenario.	Viele Stunden mit extrem niedrigem Preis, aber auch wenige Stunden mit extrem hohem Preis, hohe leistungsabhängige Preis-Komponente.
Anteil EE an Stromerzeugung	ca. 90 %	100 %

2. Soziodemografie und Wirtschaft

Die Bevölkerungsentwicklung wird gemäß der aktuellen Fortschreibung von IT.NRW angenommen [IT NRW, 2018]. Für alle Szenarien wird eine identische wirtschaftliche Entwicklung unterstellt, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Der Industrie-Sektor in NRW leistet weiter einen wichtigen Beitrag zu einem (moderaten) Wirtschaftswachstum. Die Grundstoffindustrien wachsen weiter wie bisher: Die physische Produktion bleibt in etwa konstant, positive Wertschöpfungseffekte ergeben sich hier jedoch durch höherwertige Produkte (z. B. Qualitätsstahl, Spezial-Polymere).

3. Wohngebäude

Die Sanierungsrate für die Gebäudehülle steigt kontinuierlich auf 2 % pro Jahr im Jahr 2030 an und bleibt danach konstant. Ab 2030 wird vom Passivhaus- oder RWK-55-Standard (Primärenergiebedarf 55 kWh/m², vgl. Kapitel 4.4) für alle dann zu sanierenden Gebäude ausgegangen.

Im Neubau wird der Passivhaus- oder RWK-55-Standard schon Mitte der 2020er Jahre erreicht. Die Heizungsstruktur ändert sich hin zu elektrischen Wärmepumpen mit Wärmespeicher und Umgebungs- oder Erdwärme als erneuerbare Wärmequelle. Zur Quartiersversorgung werden Nah- und Fernwärmenetze genutzt, bei denen auch Solarthermie zum Einsatz kommt. Die Effizienz elektrischer Anwendungen im Haushalt erhöht sich deutlich, durch neue Anwendungen entsteht aber zusätzlicher Strombedarf.

4. Verkehr

Der Verkehrssektor steht hinsichtlich der Ermittlung der KWK-Potenziale nicht im Fokus der Untersuchung. Er hat jedoch, abhängig von den Annahmen zur Entwicklung der Pkw- und Lkw-Fahrleistung und zum Grad der Elektrifizierung und der Nutzung synthetischer Kraftstoffe, indirekt Auswirkungen auf das Gesamtenergiesystem, insbesondere in der Wechselwirkung zu den Sektoren Energiewirtschaft und Industrie.

Der Individualverkehr nimmt durch soziodemografische Effekte und im Zuge eines gezielten Ausbaus des öffentlichen Verkehrs und der Förderung von Rad- und Fußverkehr in den Städten ab. Pkw und leichte Nutzfahrzeuge werden bis 2050 überwiegend elektrisch betrieben. Oberleitungs-Lkw (mit Brennstoffzellen-Hybrid) kommen im Schwerlast-Langstreckenverkehr zum Einsatz. Wasserstoff-Brennstoffzellen kommen in Lkw und auch in Binnenschiffen zum Einsatz.

5. Strommarkt (inkl. KWK)

Die Bruttostromerzeugung in Deutschland besteht im Jahr 2050 zu 100 % aus Erneuerbaren Energien. Für NRW gilt weiterhin der Windenergie-Erlass 2018. Der Kohleausstieg in Deutschland erfolgt im Zeitraum zwischen 2035 und 2038. Die Energieträger- und CO₂-Preise (vgl. Tabelle 17) orientieren sich am „Sustainable Development“ Szenario des World Energy Outlook (WEO) 2018 [IEA, 2018]. Der europäische Netzausbau für das Jahr 2050 wird nach der Studie E-Highways 2050 angenommen [vgl. DENA, 2021]. Die Entwicklung der Energiewirtschaft in den europäischen Nachbarländern folgt ebenfalls einem klaren Klimaschutzziel.

Die Kapazität der Kraftwerke mit KWK passt sich prinzipiell dem Wärmebedarf an und sinkt damit in der Tendenz. Gleichzeitig gibt es eine gegenläufige Tendenz: Durch

Flexibilitätsanforderungen werden KWK-Anlagen in Zukunft mit höherer Kapazität (und dementsprechend geringerer Volllaststundenzahl) ausgelegt. Durch höhere Stromkennzahlen können bei gleicher Wärmeleistung zudem höhere elektrische Leistungen installiert werden.

Der Ersatzneubau von KWK-Anlagen findet in einer Hybridbauweise mit PtH-Technologien statt, welche die jeweilige Wärmeversorgungsaufgabe auch übernehmen können. Beim Ersatzneubau von KWK-Anlagen werden diese mit Wärmespeichern flexibilisiert. Ab 2035 werden KWK-Anlagen auch vermehrt mit Wasserstoff betrieben. BHKW werden dann u. a. als Brennstoffzellen-BHKW ausgeführt. Die notwendige Wärmeversorgung wird in Zeiten hohen Stromangebots vor allem durch PtH-Anlagen sichergestellt.

Der Bestand heutiger KWK-Anlagen (allgemeine und industrielle Versorgung) bleibt grundsätzlich mit technischer Restlebensdauer im System. Für diejenigen Kohle-KWK-Anlagen, die im Rahmen des Kohleausstiegs außer Betrieb gehen, wird in Gas-KWK-Anlagen (GuD), PtH (Wärmepumpe, Elektrodenkessel) oder hybride Systeme investiert, sofern der Wärmebedarf bestehen bleibt.

6. Energieintensive Industrie

Die Stromversorgung der Industrie ist bis 2040 nahezu vollständig erneuerbar. Die Industrie-KWK wird teilweise ersetzt durch Abwärmenutzung in Kombination mit Hochtemperatur-Wärmepumpen, teilweise durch hybride KWK-PtH-Anlagen. Erdgaskessel werden zum großen Teil durch PtH-Anlagen ersetzt. Auch Industrieöfen werden umgestellt, dabei kommt neben Strom auch Wasserstoff als Brennstoff zum Einsatz.

Bis 2050 wird es keine Raffinerieproduktion mehr auf Basis von Erdöl geben. Eine Kohlenwasserstoffproduktion in NRW auf Basis von CO₂ (CCU) ist nicht vorgesehen, entsprechende Produkte werden importiert. Kunststoffabfälle sind ein wichtiger Rohstoff und werden in NRW zu Grundstoffen verarbeitet (chemisches Recycling).

7. Wasserstoffversorgung

Der zukünftige Wasserstoffbedarf in NRW wird durch einen Mix aus regionaler Versorgung und Import gedeckt. Es findet zunehmend eine Umwidmung von Erdgas-Transportpipelines zu Wasserstoffpipelines statt, um über Seehäfen Wasserstoff nach NRW transportieren zu können. Durch den Infrastrukturausbau erhalten die Industrieunternehmen ausreichende Sicherheit, um zukünftig in Wasserstoff-Technologien im industriellen Maßstab zu investieren.

4.4 Fortschreibung des Wärmebedarfs

Die Reduzierung des Wärmebedarfs der Gebäude und der Industrie (Prozesswärme) ist ein wichtiger Faktor bei der Erreichung der Klimaneutralität. Durch gezielte Einspar- und Effizienzmaßnahmen lässt sich der Wärmebedarf verringern, sodass zukünftig weniger Wärme erzeugt werden muss. Auf Basis geeigneter Modelle wurde der ermittelte Raumwärme- und Prozesswärmebedarf (s. Kapitel 2.1) bis zum Jahr 2050 fortgeschrieben.

4.4.1 Raumwärmebedarf

Um den Raumwärmebedarf prognostizieren zu können, sind verschiedene grundlegende Annahmen notwendig. In Tabelle 18 sind diese szenarioübergreifend dargelegt.

Tabelle 18: Ausgewählte szenarioübergreifende Annahmen für den Raumwärmebedarf

Indikator	Einheit	2016	2020	2030	2040	2050
Bevölkerungsentwicklung	[Personen]	17.865.516	17.908.525	17.994.544	18.080.562	18.166.992
Spezifische Wohnflächenentwicklung	[m ² /Person]	42,1	44,1	48,1	52,0	56,0
Wohnflächenentwicklung	[1.000 m ²]	752.718	789.425	864.709	940.677	1.017.352
Gradtagzahl (langfristig)	[Kelvin]	3.102	3.228	3.228	3.228	3.228
Spezifischer Warmwasserbedarf	[kWh/Person]	1.062	992	858	722	586

nach eigenen Annahmen und [IT NRW, 2018; IWU, 2021]

Die Bevölkerungsentwicklung sowie die Wohnflächenentwicklung entsprechen den Prognosen des Landesamtes für Statistik NRW [IT NRW, 2018]. Über beide Annahmen sind daraus die spezifischen Wohnflächen [m²/Person] berechnet worden. Er ist ein Indikator für die demographische Entwicklung sowie die entsprechende Bautätigkeit in einem Untersuchungszeitraum.

Die Gradtagzahl (GTZ in Kelvin) dient der Berechnung des Wärmebedarfes unter gegebenen bzw. zukünftigen klimatischen Bedingungen. Die Gradtagzahl im Bilanz-Stützjahr 2016 betrug entsprechend den statistischen (gemessenen) Zahlen 3.102 K. Die mittlere GTZ (10-Jahres Mittelwert) für die Hochrechnung der zukünftigen Bedarfe im Szenario-Zeitraum 2020 bis zum Jahr 2050 wird mit 3.228 K angenommen [vgl. IWU, 2021]. Für den spezifischen Warmwasserbedarf wird angenommen, dass der Energiebedarf technologisch erheblich gesenkt werden kann.

Für die weitere Modellierung wurden für alle Gebäude vier Raumwärme-Effizienz-Klassen (RWK) festgesetzt. Sie beinhalten sowohl Vorgaben zum Primärenergiebedarf als auch zum Transmissionswärmeverlust des Gebäudes (RWK-100, RWK-70 und RWK-55, Zahl entspricht dem Primärenergiebedarf in kWh/m²) bzw. entsprechen dem Passivhaus-Standard (PH). Die gewählten Werte der Raumwärmeklassen sind dabei als Klassendurchschnitt zu verstehen und bezeichnen nicht eine einzuhaltende Obergrenze.

In Tabelle 19 sind weitere Annahmen für die Wärmebedarfsmodellierung im Gebäudebereich (Neubau und Bestand) für das 80 %- und das Klimaneutral-Szenario gegenübergestellt.

Tabelle 19: Gegenüberstellung wichtiger Hauptmerkmale der Wärmebedarfsmodellierung

Parameter	Szenario 80 %	Szenario Kn
Sanierung Gebäudebestand		
Sanierungsrate (Umsetzungsrate)	Anstieg von derzeit 0,8 %/a auf 1,7 %/a von 2020 bis 2030, danach kontinuierliche Weiterführung bis 2050 mit 1,7 %/a.	Umsetzungsrate steigt kontinuierlich bis auf 2 %/a im Jahr 2030 an und bleibt danach konstant.
Sanierungs-effizienz	Verschärfte Anforderungen an die Sanierung im Bestand führen zu vermehrtem Einsatz von Sanierungen auf RWK-70/ RWK-55 und PH-Niveau.	Bis 2030 Sanierungen auf dem Niveau des RWK-55-Effizienzhauses, ab 2030 vorwiegend Sanierungen auf Passivhaus-Niveau.
Neubau		
Neubau-Effizienz	Verschärfte Anforderungen an den Neubau führen zu vermehrtem Einsatz von RWK-55 und PH-Niveau.	Neubau-Wärmeniveau auf Ebene des RWK-55-Standards bis 2025, ab 2025 vorwiegend auf PH-Niveau.
Heizungsentwicklung (Bestand)		
Heizungsverteilung /Substitution	Forcierte Substitution von ölbetriebenen Heizungsanlagen durch Pellet-Anlagen (Nutzung des vorhandenen Lagerraums).	Abbau von fossilen Heizungsanlagen und Ersatz durch regenerative Heizquellen (ermöglicht durch stark gesenkte Wärmelast).
Heizungseffizienz	Modernisierung von Heizkesseln mit der derzeit effizientesten Technologie	Geringe Modernisierungsquoten fossiler Heizungsanlagen, sukzessiv mehr Substitution durch regenerative Energieerzeugung, Einsatz von Wärmespeichern.
Heizungsentwicklung (Neubau)		
Heizungsverteilung	Weiterhin forcierter Einsatz von fossilen Heizungsanlagen (z. B. Gas-Brennwert) mit stärkerer Kopplung regenerativer Erzeugung (Wärmepumpen, Solarthermie) als Hybrid-Heizungssysteme.	Ausschließlicher Einsatz von nicht-fossilen Energieträgern, forcierter Einsatz von Speichern und quartiergekoppelten Anlagen.
Heizungseffizienz	Nutzung von Brennwert-Anlagen. WP-Arbeitszahlen > 3.5 (Luft/Sole)	Einsatz von Best Available Technology BAT-Technologien, Nutzung von Effizienz-Steigerungen im Bereich der Netz- und Infrastruktur-Auslegung (Nahwärme-Netze/Quartiersansatz...).

Die Übersicht zeigt, dass für das Klimaneutral-Szenario die Annahmen sehr ambitioniert sind. Die Entwicklung des Raumwärmebedarfs ist dabei vor allem von den Sanierungsraten und der Sanierungs-Effizienz abhängig. Jedoch haben auch die Heizungsentwicklung und der Neubaustandard einen Einfluss auf den Wärmebedarf.

Durch die Modellierung mit den dargestellten Annahmen und Randbedingungen wurde für die Szenarien die prozentuale Veränderung des Bedarfs für die Stützjahre 2030, 2040 und 2050 ermittelt. Die relativen Kennwerte wurden daraufhin auf das Raumwärmebedarfsmodell angewendet.

Ergebnis

Im Folgenden wird das Ergebnis der Fortschreibung des Wärmebedarfs für beide Szenarien vorgestellt (Tabelle 20).

Tabelle 20: Entwicklung des Gebäudewärmebedarfs bis 2050 für das 80 %- und Kn-Szenario

Wärmebedarf [GWh/a]	Ist-Stand	2030		2040		2050	
		80 %	Kn	80 %	Kn	80 %	Kn
Unsanierter Bestand	99.159	74.155	64.966	45.555	36.712	13.893	2.472
Sanierter Bestand	8.088	15.697	14.601	22.702	20.166	29.442	26.990
Neubau	1.606	7.836	7.146	13.633	12.276	19.040	17.769
Warmwasser	27.273	22.103	20.827	18.844	17.967	15.217	15.389
Wohngebäude	136.126	119.791	107.540	100.734	87.121	77.592	62.620
Nichtwohngebäude	82.506	70.131	66.005	56.104	47.854	41.253	29.701
Gesamt	218.632	189.922	173.545	156.838	134.975	118.845	92.321

Im 80 %-Szenario werden die wirtschaftlichen und technischen Potenziale der wärmetechnischen Einsparungen zum großen Teil ausgeschöpft. Durch ansteigende Sanierungen auf Passivhaus-Niveau wird sowohl mit einem allgemeinen Anstieg der Wärmeschutz-Güte als auch mit einer starken Kostendegression für hochwertige Dämmung gerechnet. Infolgedessen sinkt der Wärmebedarf der Wohngebäude um 43 % auf 77.592 GWh/a im Jahr 2050 (Tabelle 20).

Im Klimaneutral-Szenario wird ein breites und tiefes Maßnahmenbündel auf der Gebäudeseite durchgeführt, sodass alle Maßnahmen zur Minderung des Raumwärmebedarfs ausgeschöpft werden können. Das deutlich gestiegene Ambitionsniveau lässt sich auch in den absoluten Zahlen erkennen. So sinkt der Wärmebedarf der Wohngebäude um 54 % auf 62.620 GWh/a. Hier hat vor allem die deutliche Reduktion des Raumwärmebedarfs von Bestandsgebäuden einen großen Einfluss.

Bei den Nichtwohngebäuden ist die Reduktion des Wärmebedarfs noch stärker ausgeprägt, als bei den Wohngebäuden. So reduziert sich der Wärmebedarf im 80 %-Szenario um 50 % auf 41,3 TWh/a und im Klimaneutral-Szenario um 64 % auf 29,7 TWh/a. Die Unterschiede in

den höheren Einsparraten im Nichtwohngebäudebereich sind zum größten Teil auf die höhere Austausch-Dynamik von Alt- und Neubauten zurückzuführen. Während private Haushalte eher darauf bedacht sind Gebäude zu erhalten, wird bei Nichtwohngebäuden häufiger der Bestand durch einen Neubau ersetzt.

Der gesamte Wärmebedarf der Gebäude in NRW reduziert sich demnach im 80 %-Szenario um 46 % auf 118,8 TWh/a und im Klimaneutral-Szenario um 58 % auf 92,3 TWh/a. Im Wesentlichen wird die Entwicklung des Wärmebedarfs dabei von der angenommenen Sanierungsrate und Sanierungseffizienz bestimmt.

4.4.2 Prozesswärmebedarf der Industrie

Die Fortschreibung des Wärmebedarfs der Industrie wurde für beide Szenarien in gleicher Weise ermittelt. Ausgangsbasis sind die Werte wie in Tabelle 2 dargestellt. Für die besonders CO₂-intensiven Branchen (Gruppe 1) kam das Simulationsmodul WISEE zum Einsatz (vgl. Kapitel 2.1), für die restlichen Branchen (Gruppe 2+3) eine Fortschreibung auf Basis von Energieintensitäten.

Dazu wurden die statistisch verfügbaren Daten über Brennstoffeinsatz und Bruttowertschöpfung verwendet. Der branchenscharfe Brennstoffeinsatz ergibt sich durch eine Fortschreibung folgender Treibergrößen und Parameter:

- (Reale) Bruttowertschöpfung der Branche (ohne technische Effizienz) [vgl. AGEB, 2021 & IT.NRW, 2018]
- Zeitreihe über Entwicklung der technischen Effizienz pauschal über alle Branchen als Index, variiert je nach Szenario
- Anteil von Prozesswärme, mechanischer Energie, Raumwärme und Warmwasser am heutigen Brennstoffbedarf [vgl. AGEB, 2021] und Entwicklung der technischen Effizienz relativ zueinander

Der Anteil des betrachteten Prozesswärmebedarfs wurde branchenscharf auf Basis von eigenen Annahmen und Literaturwerten bestimmt [WAGNER & UNGER, 2002]. Diese wurden über die Zeit als konstant angenommen. Eine Ausnahme bildet der Fahrzeugbau, da hier aufgrund des Trends zur Herstellung von Elektrofahrzeugen von einer geringeren Nachfrage nach Metallgussteilen für Verbrennungsmotoren auszugehen ist. Wegen des dadurch sinkenden Schmelzwärmebedarfs wurde davon ausgegangen, dass der Anteil der KWK-fähigen Wärme in dieser Branche bis 2050 leicht ansteigt.

In Tabelle 21 sind alle KWK-geeigneten Prozesswärmebedarfe für das Klimaneutral-Szenario aufsummiert und gegenübergestellt. Dabei ist ein stetiger Rückgang auf rund 43 TWh im Jahr 2050 zu beobachten, was einem Rückgang von knapp 21 % entspricht.

Tabelle 21: Fortschreibung des Prozesswärmebedarfs (< 500 °C) für das Kn-Szenario

Prozesswärme-Gruppe [TWh/a]	2016	2030	2040	2050
Gruppe 1	37,9	35,5	32,6	30,9
Gruppe 2	5,4	1,8	1,4	1,0
Gruppe 3	11,0	11,7	11,3	10,8
Gruppe 4	0,2	0,2	0,2	0,2
Gesamt	54,5	49,2	45,5	42,9

4.4.3 Zusammenfassung

Die Modellierung des Wärmebedarfs der Gebäude und der Industrie zeigt eine klare Senkung des Bedarfs bis zum Jahr 2050 in beiden Szenarien. Am deutlichsten ist die Reduktion des Wärmebedarfs im Klimaneutral-Szenario. Abbildung 15 zeigt die Reduktion des Wärmebedarfs für das Klimaneutral-Szenario.

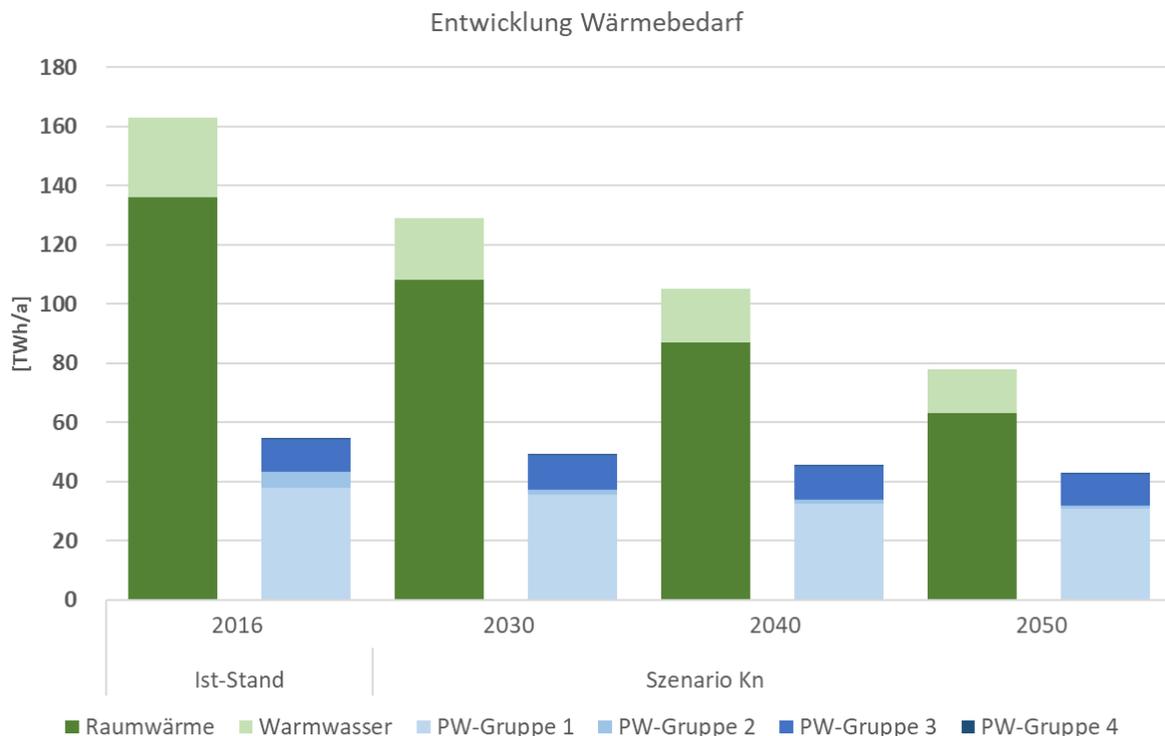


Abbildung 15: Ergebnis der Fortschreibung des Wärmebedarfs

Der Gesamtwärmebedarf wird anfangs noch deutlich vom Raumwärme- und Warmwasserbedarf dominiert. Bis zum Jahr 2050 gleichen sich die Bedarfe dann immer mehr an. Hier zeigt sich abermals das große Reduktionspotenzial durch Sanierung und Neubau beim Raumwärmebedarf.

4.5 Entwicklung des Raumkältebedarfs bis 2050

Die in Kapitel 2.2 ermittelten spezifischen Kältebedarfe je Energiebezugsfläche wurden in Abhängigkeit von der Gebäudefunktion sowie der zugewiesenen Kältegruppe unverändert auf 2050 übertragen, da sich Einspareffekte durch Effizienzsteigerungen auf der einen und steigende Volllaststunden auf der anderen Seite nahezu ausgleichen [UBA, 2011]. Allerdings steigt bis 2050 die Hitzebelastung in zahlreichen Gebieten, sodass sich die Größe der betroffenen Flächen und somit die Anzahl zu kühlender Objekte deutlich erhöht [LANUV, 2018A]. Entsprechend erhöht sich der Kühlbedarf der Wohngebäude deutlich von heute 49 GWh/a auf 77 GWh/a, während der Kühlbedarf der Nichtwohngebäude von heute 2,8 TWh nur leicht auf 2,9 TWh/a ansteigt. Trotz der hohen relativen Steigerung des Kühlbedarfs der Wohngebäude im Vergleich zu den Nichtwohngebäuden, wird der Kühlbedarf auch in Zukunft deutlich durch Nichtwohngebäude dominiert. Abbildung 16 zeigt auf Ebene der Gemeinden den Kühlbedarf der Wohn- und Nichtwohngebäude im Jahr 2050.

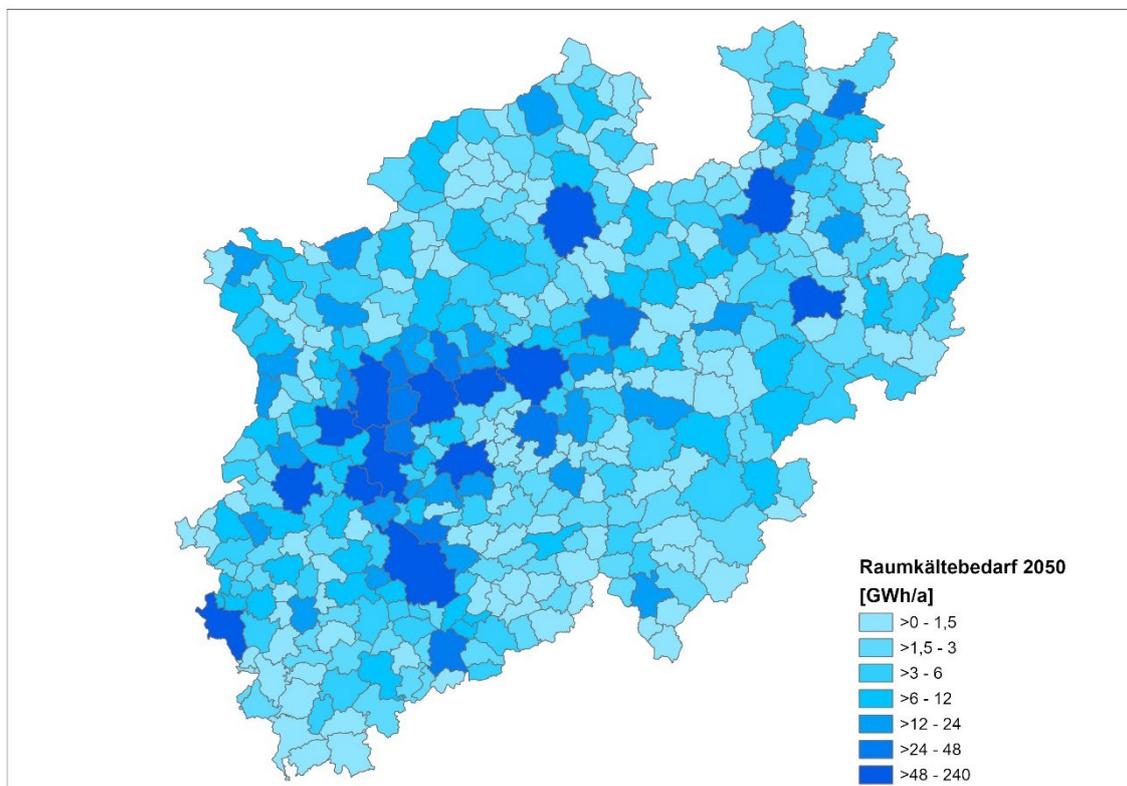


Abbildung 16: Raumkältebedarf auf Ebene der Gemeinden 2050

Zwar erhöht sich der Kältebedarf bis 2050 leicht auf insgesamt 3 TWh/a, allerdings verbleibt er auf niedrigem Niveau, sodass er im Vergleich zum Wärmebedarf energetisch eine untergeordnete Rolle spielt. Die Erzeugung von Kälte durch KWK über Sorptionskälteanlagen ist zwar grundsätzlich ein denkbarer Anwendungsfall, anhand der Relationen von Wärme- zu Kältebedarf ist jedoch klar, dass auch in Zukunft die KWK-Potenziale durch die Wärme bestimmt werden.

4.6 Potenziale und Nutzung der Erneuerbaren Energien bis 2050

Um die KWK-Potenziale in NRW bis 2050 erfassen zu können, ist auch die Kenntnis über weitere Komponenten des ganzheitlichen Wärmeerzeugungssystems bedeutend. Daher wurde auf Basis bestehender Studien eine Abschätzung der Entwicklung der erneuerbaren Energieträger zur Wärmeerzeugung für die Fernwärme und die Industrie bis 2050 durchgeführt.

Dazu wurden folgende klimafreundliche Energieträger mit Relevanz bei der leitungsgebundenen Wärmeversorgung (Fernwärme) im Rahmen dieser Studie analysiert.

- Warmes Grubenwasser
- Biomasse
- Industrielle Abwärme
- Große Solarthermie
- Müllverbrennungsanlagen/Abfall
- Gruben-, Deponie- und Klärgas

Nicht näher untersucht oder berücksichtigt wurden die Potenziale der Tiefen Geothermie. Aus heutiger Sicht gibt es große Unsicherheiten bzgl. der Entwicklung dieser Technologie in NRW und keine verlässlichen Potenzialabschätzungen. Die Tiefe Geothermie wurde daher nicht weiter betrachtet.

Alle hier betrachteten klimafreundlichen Energieträger gehen als feste Randbedingung in die Entwicklung der Zielsysteme (vgl. Kapitel 4.9) ein, da sie aus Effizienzgründen und somit zur Erreichung der Klimaneutralität vorrangig gegenüber synthetisch hergestellten Energieträgern genutzt werden sollten. Nicht enthalten sind weitere zukunftssträchtige Energieträger wie Wasserstoff und sonstige Umweltwärme zur Nutzung über Wärmepumpen. Diese werden bei dem Aufbau der Zielsysteme über wirtschaftliche Faktoren modelliert.

Die Analysen wurden sowohl für die Entwicklung in der allgemeinen Versorgung (Fernwärme) sowie für die energieintensive Industrie durchgeführt. Das Aufkommen der hier dargestellten klimafreundlichen Energieträger wird, mit Ausnahme der Biomasse, nur für die Fernwärme erwartet. Da jedoch auch die Industrie einen Anteil ihres Wärmebedarfs über Fernwärme deckt, enthält die Wärmeversorgung der Industrie in geringem Umfang über den Anteil der Fernwärme im Wärmemix auch solche Energieträger, die nur für die Fernwärme relevant sind. Somit bezieht die Industrie auch Anteile von z. B. warmem Grubenwasser oder großer Solarthermie, obwohl diese Wärmeerzeugung nicht am Industriestandort selbst erfolgt.

Warmes Grubenwasser

Die Potenziale für die Nutzung von warmem Grubenwasser in der Fernwärme werden aus der Potenzialstudie Warmes Grubenwasser [LANUV, 2018B] und den Wärmenetzen abgeleitet. Aus der Potenzialstudie gehen acht Standorte von Wasserhaltungen hervor, für die ein potenzieller Wärmeertrag in Höhe von 1.440 GWh/a im Jahr 2050 ausgewiesen wird. Dieser Wärmeertrag wurde ins Verhältnis zu den bestehenden Wärmenetzen inklusive der Erweiterungsgebiete in räumlicher Nähe gesetzt. In Abhängigkeit von den Szenarien wurde

angenommen, dass maximale Anteile des warmen Grubenwassers in den zugeordneten Wärmenetzen im Jahr 2050 von 30 % im 80 %-Szenario und von 50 % im Klimaneutral-Szenario erreicht werden können. Die verschiedenen maximalen Anteile spiegeln wider, dass die Szenarien unterschiedlich ambitioniert sind und der Druck, neue CO₂-freie Wärmequellen zu erschließen, umso größer wird, je ambitionierter das Szenario ist. Die vollständige Abdeckung des Fernwärmebedarfs über das Warme Grubenwasser im zugeordneten Netz, wurde aufgrund verschiedener bestehender Hemmnisse (z. B. Temperaturniveau, Spitzenlast) bei der Nutzung des warmen Grubenwassers als nicht realistisch eingestuft. Damit ergeben sich die in Tabelle 22 genannten Potenziale. Deutlich wird, dass die in der Potenzialstudie ermittelten Potenziale selbst im Klimaneutral-Szenario nur zu ca. 75 % ausgeschöpft werden können, da Wärmesenken in der Nähe einiger Wasserhaltungen fehlen.

Tabelle 22: Fortschreibung der Nutzung des Warmen Grubenwassers in NRW

Szenario	Warmes Grubenwasser [GWh/a]		
	2030	2040	2050
80 %	435	869	869
Kn	534	1.067	1.067

Biomasse

Dieser Abschnitt behandelt die Potenziale der Biomasse ohne Klärgas und biogene Anteile der Müllverbrennung, da diese separat betrachtet wurden. Zentrale Datenbasis zur Fortschreibung ist die Biomasse-Potenzialstudie [LANUV, 2014]. In dieser sind Potenzialmengen für die einzelnen Teilfraktionen (Waldholz, Anbaubiomasse etc.) angegeben. Für diese Teilmengen wurde jeweils ein Potenzialnutzungsgrad sowie eine zeitliche Entwicklung festgelegt. Da ein großer Teil der Biomassepotenziale schon heute intensiv genutzt wird, ist lediglich mit einem geringen Zuwachs zu rechnen. Dieser ist im Klimaneutral-Szenario etwas größer als im 80 %-Szenario (Tabelle 23).

Tabelle 23: Fortschreibung der Biomassenutzung in NRW

Szenario	Biomassenutzung [GWh/a]		
	2030	2040	2050
80 %	6.100	6.357	6.615
Kn	6.464	6.694	6.983

Zusätzlich wurde jeweils abgeschätzt, wie viel dieser Wärme auf die Einspeisung in Wärmenetze der allgemeinen Versorgung entfällt und wie viel auf die energieintensive Industrie.

Industrielle Abwärme

Die industrielle Abwärme ergibt sich aus der Hebung von Effizienzpotenzialen in der Industrie und wird sowohl betriebsintern als auch extern über Wärmenetze nutzbar gemacht. Besonders im Klimaneutral-Szenario werden weitreichende Effizienzmaßnahmen und damit hohe Abwärmepotenziale erwartet (vgl. Kapitel 4.7). Die industrielle Abwärme wird in dieser Studie aus folgenden Gründen nur hinsichtlich der externen Nutzung für die Fernwärme betrachtet:

- Der in den Szenarien ermittelte Wärmebedarf der Industrie (vgl. Kapitel 4.4.2) ist bereits um Effizienzgewinne aus interner Abwärmennutzung bereinigt
- Es wird davon ausgegangen, dass die externe Abwärmennutzung nur indirekt über Fernwärme erfolgt, da keine Aussagen über Abwärmepotenziale aus den Industrieunternehmen jeweils benachbarter Unternehmen mit Abwärmepotenzial gemacht werden können. Die Potenzialstudie zur industriellen Abwärme [LANUV, 2019] analysiert die heutige Nutzung sowie das heutige Potenzial der industriellen Abwärme in NRW, enthält jedoch keine Entwicklung des Potenzials bis 2050. Daher wurde bei der Fortschreibung auf die BDI-Szenarien Deutschland [BCG & PROGNOSE, 2018] zurückgegriffen und diese auf NRW übertragen. Zwar wurde bei den BDI-Szenarien ein 95 %-Reduktionspfad verfolgt und kein klimaneutraler Pfad, da sich die beiden Pfade jedoch bzgl. der Wärmeversorgung stark ähneln, werden die Pfade für die Analyse dieser Studie gleichgesetzt

Da der Primärenergieverbrauch der Industrie in NRW im Vergleich zum Gesamtverbrauch in Deutschland überproportional groß ist, wird vermutet, dass auch das Potenzial der Nutzung industrieller Abwärme in NRW verhältnismäßig größer ist als im Mittel über ganz Deutschland. Aus einem Abgleich des heutigen Primärenergieverbrauchs in der Industrie für NRW und für Deutschland wurden die ursprünglichen Werte für Deutschland auf NRW angepasst, d. h. die Anteile erhöht. Das Ergebnis (Tabelle 24) deckt sich in der Tendenz zudem gut mit den Ergebnissen aus den Diskussionen der Workshops (vgl. Kapitel 4.7), da hier ein höherer Anteil der industriellen Abwärme für NRW erwartet wurde.

Tabelle 24: Fortschreibung der Nutzung der industriellen Abwärme in NRW

Szenario	Industrielle Abwärme [GWh/a]		
	2030	2040	2050
80 %	4.762	5.649	7.436
Kn	4.762	5.649	7.436

Die laut der Potenzialstudie Industrielle Abwärme [LANUV, 2019] heute technisch verwendbare Abwärmemenge beträgt je nach Berechnungsmethode ca. 44-48 TWh/a in NRW. Das in der hier vorliegenden Studie abgeschätzte bis 2050 fortgeschriebene Potenzial von 7,4 TWh/a liegt deutlich darunter, was vor dem Hintergrund der angenommenen und oben beschriebenen Randbedingungen realistisch erscheint.

Große Solarthermie

Auch für die große Solarthermie aus Freiflächenanlagen wurden die BDI-Szenarien für Deutschland [BCG & PROGNOSE, 2018] als Grundlage herangezogen und mit NRW-spezifischen Flächenpotenzialen abgeglichen. Wie für die industrielle Abwärme wurden auch für die Solarthermie die relativen Anteile an der gesamten Fernwärmeerzeugung für die jeweiligen Szenarien abgeleitet. Dabei ergeben sich folgende Werte für NRW (Tabelle 25):

Tabelle 25: Fortschreibung der Nutzung der großen Solarthermie in NRW

Szenario	Große Solarthermie [GWh/a]		
	2030	2040	2050
80 %	1.880	3.379	3.850
Kn	2.115	3.379	4.052

Die maximale Summe der Wärmeerzeugung über Solarthermie beträgt 4.052 GWh/a im Klimaneutral-Szenario im Zieljahr 2050. Bei einem angenommenen Kollektorsertrag von 425 kWh/(m²·a) (Referenzwert aus heutigen Solarthermie-Anlagen) entspricht dies einer benötigten Kollektorfläche von ca. 10 km² bzw. etwa doppelter Grundfläche von ca. 20 km². Bezogen auf die Gesamtfläche des Bundeslands NRW sind dies wiederum 0,06 %. Dieser Wert wurde als durchaus realistisch angesehen, da im Vergleich Schätzungen für Onshore-Windenergie zur Erreichung der Klimaneutralität beim Flächenbedarf bzw. -nutzung von einer Größenordnung von ca. 2 % der Fläche Deutschlands ausgehen [STIFTUNG KLIMANEUTRALITÄT, 2021].

Müllverbrennungsanlagen/Abfall

Basierend auf jährlichen Erhebungen des LANUV bei den Müllverbrennungsanlagen in NRW liegt die Wärmeauskopplung bei rund 3.000 GWh/a. Es wird davon ausgegangen, dass die Hausmüllmengen und deren thermische Nutzung – unabhängig von den Szenarien – weitgehend konstant bleiben. Deshalb wird von einem bis 2050 gleichbleibenden Wärmebeitrag ausgegangen.

Grubengas

Die derzeitige Grubengas-Nutzung verringert sich aufgrund des steigenden Grubenwasserspiegels fortlaufend, sodass im hier untersuchtem Stützjahr 2040 voraussichtlich kein Grubengas mehr in NRW gefördert wird. Bis dahin wird ein linearer Rückgang unterstellt, sodass lediglich im Stützjahr 2030 geringe Mengen eingerechnet werden (s. Tabelle 26).

Tabelle 26: Fortschreibung der Nutzung von Grubengas in NRW

KWK-Szenario NRW	Grubengasnutzung 2030 [GWh/a]		
	2030	2040	2050
80 %	75	0	0
Kn	75	0	0

Deponiegas

Die Nutzung von Deponiegas läuft sukzessive aus, sodass voraussichtlich ab dem Jahr 2030 keine relevante Menge mehr zur Verfügung steht [LANUV, 2014]. Deshalb bleibt dieser Energieträger in allen Szenarien unberücksichtigt.

Klärgas

Den Zahlenreihen in Tabelle 27 liegt die Annahme zugrunde, dass für alle Szenarien ca. 90 % des in der Biomassestudie ermittelten Potenzials (1.408 GWh/a) langfristig in die Umsetzung kommen können. Es wird angenommen, dass der Ausschöpfungsgrad je Stützjahr um pauschal 10 % schneller ansteigt, wenn höhere Klimaschutzziele angesetzt werden.

Tabelle 27: Fortschreibung der Klärgasnutzung in NRW

KWK-Szenario NRW	Klärgasnutzung [GWh/a]		
	2030	2040	2050
80 %	903	1.137	1.267
Kn	937	1.204	1.267

Ergebnis

Die Diagramme in Abbildung 17 und Abbildung 18 zeigen zusammengefasst die Ergebnisse der erwarteten Entwicklung für die betrachteten klimafreundlichen und erneuerbaren Energieträger in der Fernwärme für das 80 %- und für das Klimaneutral-Szenario. Die hier dargestellte Bezugsgröße der Fernwärmeerzeugung wird in Kapitel 4.8 näher erläutert.

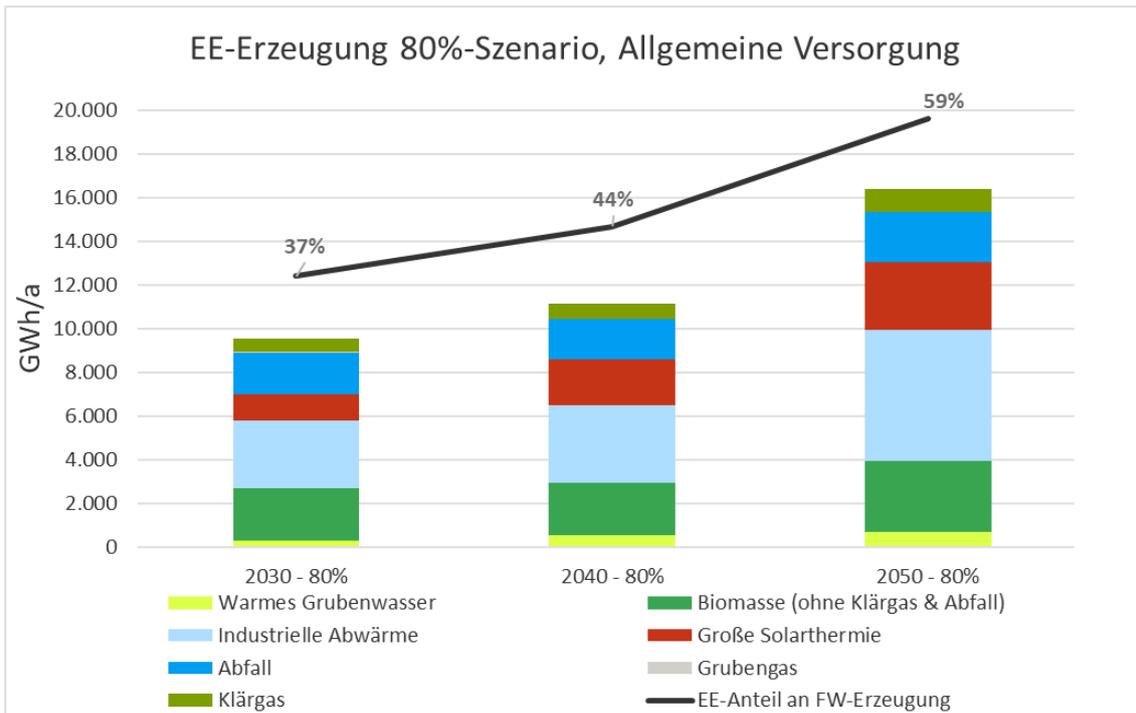


Abbildung 17: Entwicklung der erneuerbaren und klimafreundlichen Energieträger in der Allgemeinen Versorgung – 80 %-Szenario

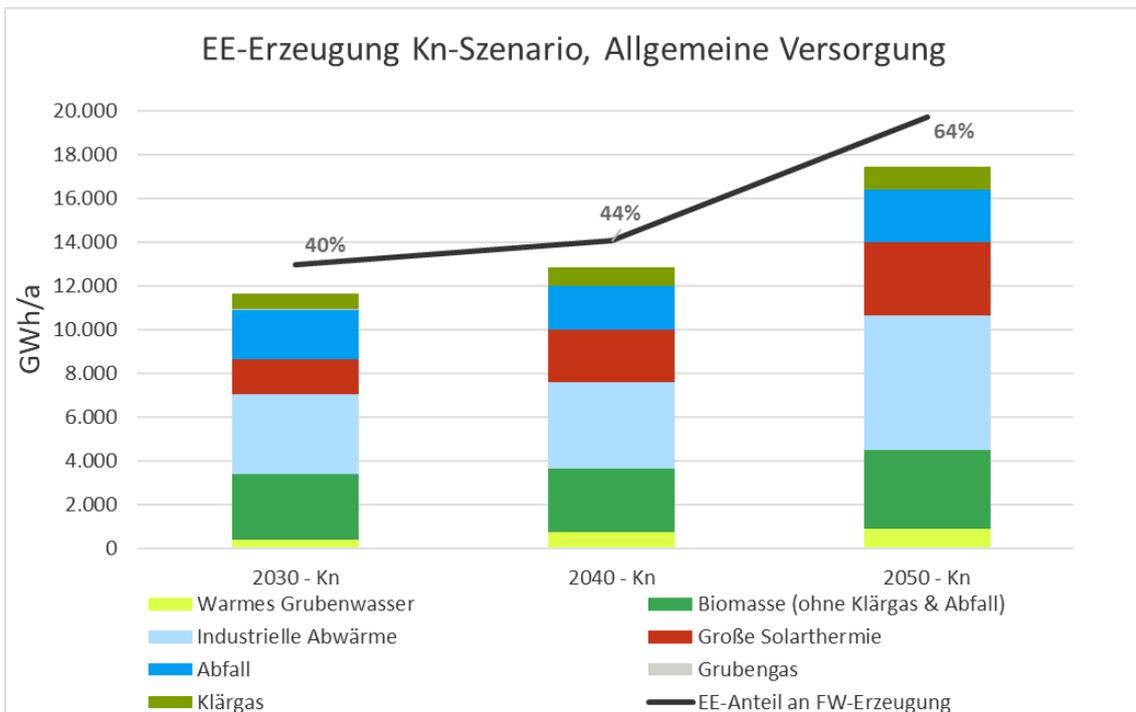


Abbildung 18: Entwicklung der erneuerbaren und klimafreundlichen Energieträger in der Allgemeinen Versorgung – Kn-Szenario

Die klimafreundlichen Energien in der allgemeinen Versorgung haben in beiden Szenarien im Jahr 2050 mit 59 % bis 64 % hohe Anteile an der Fernwärmeerzeugung. Die absoluten Erträge unterscheiden sich dabei nicht wesentlich voneinander. Wichtig ist hierbei, dass in der Auswertung sowohl die erneuerbare Wärmeerzeugung über Wärmepumpen, als auch über Wasserstoff noch nicht enthalten ist, da deren Analyse Bestandteil der Entwicklung der Zielsysteme (vgl. Kapitel 4.9) war.

Besonders großes Potenzial wird in der Nutzung industrieller Abwärme mittels Einspeisung in das Fernwärmenetz gesehen. Es folgt die Nutzung von Biomasse und die Wärmeerzeugung mittels Freiflächen-Solarthermie. Wie bereits erwähnt, wurde die Tiefengeothermie aufgrund heute noch bestehender Unsicherheiten über deren Potenziale in NRW nicht berücksichtigt. Wenn sich die Entwicklung dieser Technologie auch für die Anwendung in NRW als wirtschaftlich tragfähig erweisen sollte, käme möglicherweise eine weitere erneuerbare Wärmequelle für die leitungsgebundene Wärmeversorgung hinzu.

Die Ergebnisse der erwarteten Entwicklung der klimafreundlichen Energieträger in der energieintensiven Industrie sind in den folgenden beiden Diagrammen Abbildung 19 und Abbildung 20 dargestellt.

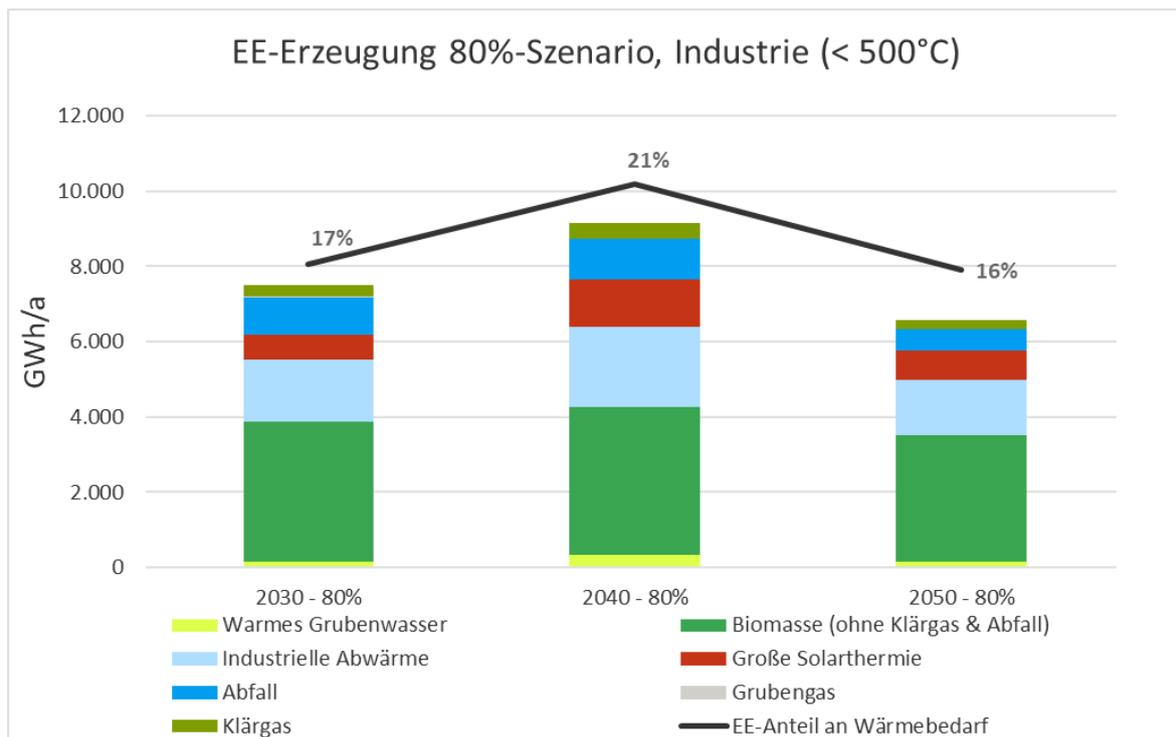


Abbildung 19: Entwicklung der erneuerbaren und klimafreundlichen Energieträger in der energieintensiven Industrie – 80 %-Szenario

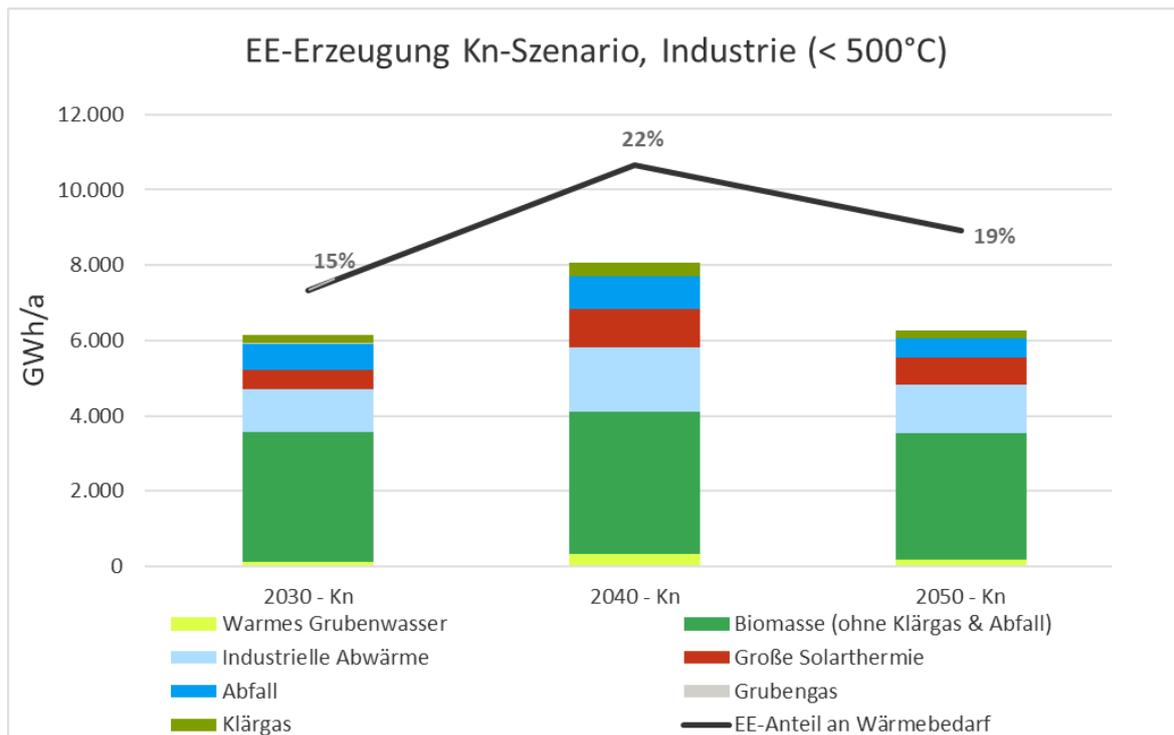


Abbildung 20: Entwicklung der erneuerbaren und klimafreundlichen Energieträger in der energieintensiven Industrie – Kn-Szenario

Anders als für die allgemeine Versorgung wird für die energieintensive Industrie ein geringerer Anteil Erneuerbarer Energien zur Deckung des Wärmebedarfs erwartet. Er beträgt je nach Szenario nur zwischen 16 % und 19 % im Jahr 2050. Auffällig ist, dass der erneuerbare Anteil im Jahr 2040 höher liegt als 2050. Dies liegt daran, dass einige erneuerbare und klimafreundliche Energieträger nur über den Fernwärme-Bezug in der Bilanz enthalten sind und die erwartete Fernwärmemenge in der Industrie etwas abnimmt. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass, wie bei der Fernwärme auch, erneuerbarer Strom und erneuerbarer Wasserstoff in dieser Bilanz noch nicht enthalten sind. Gerade Strom (PtH) und Wasserstoff (PtG) sind für die industrielle Prozesswärmeversorgung perspektivisch relevante Energieträger. Da der Wärmebedarf im Klimaneutral-Szenario am stärksten sinkt, sind die absoluten Zahlen der erneuerbaren Wärmeerzeugung hier geringer als im 80 %-Szenario. Das größte Potenzial wird in der Nutzung von Biomasse gesehen, die auch lokal zur Wärmeerzeugung eingesetzt werden kann. Eine geringere Bedeutung haben die industrielle Abwärme und Freiflächen-Solarthermie, die beide gemäß den Annahmen dieser Studie nur indirekt über den Fernwärme-Bezug zur Deckung des Wärmebedarfs in der Industrie genutzt werden können. Der Anteil intern genutzter Abwärme in der Industrie ist in diesen Betrachtungen nicht enthalten.

Die in diesem Abschnitt ermittelten erneuerbaren Wärmepotenziale für die Fernwärme und die Industrie gingen wie erwähnt als feste Randbedingung in die Entwicklung der Zielsysteme (s. Kapitel 4.9) ein.

4.7 Workshops

Im Februar und März 2020 wurden Workshops zur allgemeinen Fernwärmeversorgung und zur industriellen Wärmeversorgung durchgeführt. Ziel der beiden Workshops war, das Wissen und die Erfahrung möglichst vielfältiger Akteure aus der Praxis der öffentlichen bzw. industriellen Wärmeversorgung in NRW in das Projekt und die Analyse zukünftiger KWK-Potenziale einzubinden. Die Ergebnisse der beiden Workshops sind in die weitere Projektarbeit eingeflossen.

4.7.1 Workshop zur allgemeinen Versorgung

Der Workshop „Zukünftige Wärmeerzeugung in der allgemeinen Versorgung unter Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kopplung“ fand am 18.02.2020 beim LANUV in Duisburg statt. Insgesamt waren 27 Teilnehmende anwesend, davon 19 externe Teilnehmende von Stadtwerken und Energieversorgern, Städten, Verbänden und dem MWIDE.

Der Workshop befasste sich mitentscheidenden Fragestellungen hinsichtlich der Entwicklung der allgemeinen Wärmeversorgung in NRW, d. h. der leitungsgebundenen Nah- und Fernwärmeversorgung. Ziel des Workshops war die Aufnahme der Fachmeinungen aus dem Kreis der Teilnehmenden. Es wurden vier Themenbereiche vorgegeben, nach denen sich der Workshop und die Diskussionsgruppen gliederten:

- a) Wärmenetze
z. B. Erweiterung, Verdichtung, neue Inseln, Zusammenschluss von Netzen, Perspektive Dampfnetzumstellung, Temperaturniveauabsenkung, Speicherbedarf, Ordnungsrecht
- b) Energieträger
z. B. Strom, synthetische Brennstoffe, Erneuerbare Energien, Abwärme
- c) Erzeugung
z. B. Umrüstung bestehender KWK-Anlagen (Brennstoffwechsel), Umrüstung bestehender Kraftwerke auf KWK, Rückverstromung von synthetischen Gasen in KWK, erneuerbare Wärme, Power-to-Heat, individuelle Versorgungstechnologien, Flexibilisierung
- d) Abwärmenutzung
z. B. relevante Industriebranchen, Temperaturniveaus, Kooperationsmodelle Industrie/Versorger

Der Fokus der Diskussion lag dabei auf den beiden Szenarien 80 % und Klimaneutral. Darauf aufbauend fanden die Diskussionen der möglichen Auswirkungen der Szenarien auf die Entwicklung der allgemeinen Wärmeversorgung statt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Workshops für die vier Themenbereiche zusammengefasst.

Wärmenetze

Es bestand Einigkeit darüber, dass Wärmespeicher, der Ausbau von Wärmenetzen und eine strukturierte kommunale Wärmeplanung, einschließlich der Durchsetzung ordnungsrechtlicher Maßnahmen, relevante Bausteine zur Erfüllung der CO₂-Reduktionsziele sind. Geringer eingestuft wurde die Relevanz der Temperaturabsenkung bis hin zu Kaltwassernetzen. Im 80 %-Szenario werden zudem weiterhin sowohl Gas- als auch Wärmenetzstrukturen in Neubaugebieten erwartet sowie der Weiterbetrieb bestehender Dampfnetze. Es konnte kein Konsens bezüglich eines Anschlusszwangs im 80 %-Szenario erzielt werden.

Energieträger

Eine hohe Relevanz wird den Energieträgern synthetisches Gas (u. a. aufgrund des Potenzials zur Nutzung von Synergieeffekten mit bestehenden Gas-Infrastrukturen), Strom (u. a. mittels Wärmepumpen in Kombination mit Niedertemperatur-Wärmequellen wie Luft, Erdwärme und Grubenwasser) sowie Abwärme aus der Industrie zugeschrieben. Außerhalb von Ballungsräumen wird nach Einschätzung der Fachleute auch Biomasse eine nennenswerte Rolle spielen. Mit geringerer Relevanz wiederum werden die erneuerbaren Energieträger Solarthermie, Tiefe Geothermie und Biomasse in größeren Anlagen bewertet.

Wärmeerzeugung

In beiden Szenarien wurde die KWK auch als zukünftig relevante Technologie eingeschätzt, jedoch auf Basis unterschiedlicher Erwartungen hinsichtlich der Relevanz synthetischer Brennstoffe. Die Abwärmenutzung sowie Power-to-Heat mittels Wärmepumpen werden für beide Szenarien ebenfalls mit hoher Relevanz bewertet. Die zukünftige Nutzung tiefer Geothermie ist noch mit großen Unsicherheiten behaftet und wird mit einer tendenziell geringen Relevanz hinsichtlich des zukünftigen Wärmeversorgungssystems eingeschätzt. Uneinig waren sich die Teilnehmenden bzgl. der zukünftigen Rolle von großer Solarthermie sowie der Biomasse im Klimaneutral-Szenario.

Abwärme

Die Abwärmenutzung wurde für das Klimaneutral-Szenario mit hoher Relevanz eingestuft, da sie als essenziell im Rahmen der vorgesehenen Effizienzsteigerung angesehen wird. Dies gilt auch für das 80 %-Szenario, jedoch mit einer etwas geringeren Relevanz. Die Niedertemperatur-Abwärmenutzung und Niedertemperatur-Wärmenetze wurden im Klimaneutral-Szenario mit mittlerer und im 80 %-Szenario mit geringer Relevanz bewertet.

4.7.2 Workshop Industrie

Der Workshop „Zukünftige Wärmeerzeugung in der Industrie unter Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kopplung“ fand am 03.03.2020 beim LANUV in Duisburg statt. Von den insgesamt 20 Teilnehmenden kamen 14 Expertinnen und Experten von Verbänden, Industrieunternehmen, Planung, Beratung, Forschung, Gasversorgung und Anlagenherstellung. Ziel war es, auf Basis des erwarteten industriellen Wärme- und Dampfbedarfs, sich verändernder Rahmenbedingungen und der technischen Optionen über sinnvolle Möglichkeiten der Erzeugung zu diskutieren und eine plausible Gesamtentwicklung zu prognostizieren. Auf Basis des erwarteten industriellen Wärme- und Dampfbedarfs sollten Rahmenbedingungen und technische Optionen zur Erzeugung diskutiert und ein plausibles Gesamtbild entwickelt werden.

Der Workshop gliederte sich inhaltlich in die beiden Bereiche

- a) Nachfrage (Industrielle Wärme-/Dampfbedarfe) und
- b) Erzeugung (Industrie-KWK-Anlagen).

Während auf der Nachfrageseite die unterschiedlichen Branchen näher diskutiert wurden, standen auf der Erzeugungsseite die Technologien und deren Entwicklung im Vordergrund.

Ergebnisse Entwicklung Industrie & industrielle Wärmebedarfe (Nachfrageseite)

Die Veränderungen im Transformationsprozess hin zu einer klimaneutralen Industriewärmeversorgung wurden von den Fachleuten beispielhaft für die Branchen Chemie, Stahl sowie branchenübergreifend für die allgemeine Prozessindustrie diskutiert.

In der energieintensiven Grundstoffchemie wurden von den Akteuren nur noch wenige verbleibende technische und wirtschaftliche Potenziale für Energieeffizienz und THG-Minderungen gesehen. In der Stahlindustrie wird neben dem prozessbedingten Einsatz von fossilen Brennstoffen (insbesondere Koks) zur Reduktion von Eisenerz vorwiegend Hochtemperaturwärme für Schmelz- und Warmhalteprozesse eingesetzt. Da dies kein Anwendungsfeld für Heißwasser oder Dampf ist, ist sie somit keine KWK-Branche im eigentlichen Sinne, tritt aber als KWK-Anlagenbetreiber bei der Nutzung von Kuppelgasen aus den Hüttenwerken auf. Diese könnten bei zukünftig wasserstoffbasierten Verfahren wegfallen und somit auch der Brennstoff für die bestehenden KWK-Anlagen. Bei der Prozessindustrie wurden in vielen etwas weniger energieintensiven Branchen wie beispielsweise der Lebensmittelindustrie, der sonstigen verarbeitenden Chemie oder der Papierindustrie von den Akteuren noch hohe Effizienzpotenziale gesehen (vgl. [LANUV, 2019]).

Ergebnisse Entwicklung Wärmeversorgung (Erzeugungsseite)

Im Bereich der Wärmeversorgung diskutierten die Teilnehmenden die zukünftige Rolle der KWK, die Bedeutung von Infrastrukturen (mit Fokus auf Strom- und Wasserstoffnetze) sowie die Relevanz verschiedener Energieträger.

Aus fachlicher Sicht entscheidet sich die Frage, wie zentral oder dezentral eine KWK-Anlage ausgeführt wird, vorwiegend an der Wirtschaftlichkeit. Auch wenn der Wärmebedarf

Voraussetzung für die KWK-Nutzung ist, wird sich nach Einschätzung der Teilnehmenden des Workshops das KWK-Potenzial zukünftig insbesondere an der Strom-Residuallast orientieren. Insgesamt betonen die Fachleute die Relevanz von flexibler KWK, da aus ihrer Sicht das Risiko eines unzureichenden Stromtrassenausbaus besteht. Der Ausbau der Stromnetze wird von den Teilnehmenden grundsätzlich als ein entscheidender Faktor angesehen sowohl für die allgemein hohe Industriestromnachfrage als auch speziell für die zukünftigen Potenziale zur treibhausgasneutralen Erzeugung von Prozesswärme mit Hilfe von PtH-Anwendungen. Die Umnutzung bestehender Erdgasleitungen bzw. die Etablierung von Wasserstoffnetzen wird mittel- bis langfristig als wichtige Voraussetzung für den Einsatz von industriellen KWK-Anlagen auf Basis erneuerbarer Gase gesehen.

Die Diskussion zeigte, dass vor allem für das Klimaneutral-Szenario dem Energieträger Wasserstoff die höchste Bedeutung zugemessen wird. Wasserstoffbasierte KWK-Anlagen (Motoren und Turbinen) werden als wichtiges Element zur Abdeckung der Residuallast im Stromnetz gesehen. Nach dem Wasserstoff wird der Einsatz von Strom (Power-to-Heat) als nächstwichtigster Energieträger gesehen. Während der Einsatz von Wärmepumpen zur Nutzung von Ab- und Umweltwärme vorwiegend auf den Niedertemperaturbereich unterhalb von 100°C beschränkt sein wird (mit Ausnahme von HT-Wärmepumpen), können Elektro- und Elektrodenkessel auch höhere Temperaturbereiche bedienen. Die Relevanz von Biomasse/Biogas/Biomethan wurde uneinheitlich eingeschätzt und liegt, insbesondere wegen vermuteter begrenzter lokaler und nachhaltiger Potenziale, insgesamt leicht unterhalb von Strom. Über die Nutzungspotenziale von Tiefengeothermie herrschen noch große Unsicherheiten hinsichtlich Potenzial und Wirtschaftlichkeit. Sofern das lokale geothermische Temperaturniveau zur Anforderung passt, kann diese erneuerbare Wärmequelle eine interessante Option werden. Erdgas ist aus heutiger Sicht der wichtigste Energieträger für die Bereitstellung von industrieller Prozesswärme. Hier herrscht jedoch Einigkeit, dass dieser fossile Energieträger in einer vollständig dekarbonisierten Welt nicht mehr zur Anwendung kommen wird.

Zudem wurde die Bedeutung von Großspeichern (thermische Speicher und H₂-Speicher) zur flexiblen Wärmebesicherung betont. Ebenfalls große Bedeutung wird der zukünftigen Abwärmenutzung beigemessen, sowohl zur Stromerzeugung, als auch zur Nutzbarmachung durch Wärmepumpen durch Anheben auf ein brauchbares Temperaturniveau. Die gezielte Ansiedlung von Abwärmequellen (z. B. Rechenzentren) in Kombination mit Wärmepumpen wurde dafür beispielhaft genannt. Wenn es gelingt, industrielle Dampfversorgungs- in Heißwasserversorgungslösungen umzuwandeln, ergeben sich neue Potenziale für die zusätzliche Versorgung der Industrie mit Fernwärme (aus dem Netz der allgemeinen Versorgung). Umgekehrt könnte auch die Einbindung von Industrie-KWK-Wärme in Fernwärmenetze perspektivisch interessant werden.

4.7.3 Erkenntnisse aus den Workshops und deren Verwendung in der Studie

In beiden Workshops konnten die Meinungen der Fachteilnehmenden zu der erwarteten zukünftigen Entwicklung der Wärmesysteme in der allgemeinen Versorgung sowie der Industrie in konstruktiven Diskussionen eingeholt werden. Die Ergebnisse fanden bei der Entwicklung der Zielsysteme (s. Kapitel 4.9) Eingang in die skizzierten Szenarien, u. a. durch Berücksichtigung bei der Abschätzung der Potenziale erneuerbarer Wärmeherzeugung.

Relevant hierbei ist u. a. die Einschätzung über die potenziellen Anteile einzelner Energieträger und Technologien in der zukünftigen Wärmeversorgung.

Aus den Diskussionen wurde aber auch deutlich, dass die Bandbreite der möglichen Zukunftsbilder hinsichtlich der Wärmeversorgung groß ist. Insbesondere in dem ambitionierten Klimaschutzszenario ist das Ziel bezüglich vollständiger Klimaneutralität zwar klar definiert, die technische Ausgestaltung der Systeme zur Erreichung des Ziels sowie der Weg dorthin hält jedoch noch viele Optionen offen und ist mit Unsicherheiten behaftet.

Als übergeordnetes Fazit aus beiden Workshops ergibt sich daher insgesamt ein heterogenes Bild der erwarteten Entwicklung. Es besteht jedoch in vielen Punkten Einigkeit hinsichtlich grundsätzlicher Tendenzen wie z. B. die zukünftig hohe Relevanz von Wasserstoff in KWK-Anwendungen sowie Power-to-Heat mit dem Fokus auf die Wärmepumpen-Technologie (im Temperaturbereich bis ca. 150°C). Ferner werden übergeordnet auch hohe Potenziale der Effizienzsteigerung in der Industrie in Kombination mit der internen Abwärmenutzung zur Wärmeversorgung sowie der Einspeisung in Fernwärmenetze gesehen.

4.8 Sonstige Inputwerte und Datenquellen

Um die Zielsysteme aufbauen und das zukünftige KWK-Potenzial in NRW bis 2050 bewerten zu können, ist die Festlegung einer Vielzahl von Randbedingungen notwendig. Diese sind neben szenariospezifischen Daten (vgl. u. a. Kapitel 4.3) und den Festlegungen zum Potenzial der erneuerbaren Wärmeerzeugung (s. Kapitel 4.6) weitere Inputwerte, die in diesem Kapitel dargestellt werden. Dabei wird auf den prognostizierten Fernwärme-Anteil und das vorhandene CO₂-Budget vertieft eingegangen, da diese beiden Rahmenbedingungen feste Zielgrößen für die Entwicklung der Zielsysteme waren.

Fernwärme-Anteil

Zum Aufbau der Zielsysteme wurden die Wärmebedarfe der Wohngebäude, der Nichtwohngebäude und der Industrie als Grundlage verwendet (s. Kapitel 4.4). Die Fernwärmeerzeugung wurde anhand der szenariospezifischen Fernwärme-Anteile ermittelt und um die angenommenen zukünftigen Netzverluste erhöht. Die resultierenden Ergebnisse der Fernwärmeerzeugung (entspricht dem „Fernwärmeausstoß“ der NRW Energiestatistik [LANUV, 2021]) sind anschließend Berechnungsgrundlage für die Zielsysteme.

Die Berechnungsgrundlage für die Zielsysteme in der Industrie ist der Prozesswärmebedarf. Jedoch sind auch die Fernwärme-Anteile am Wärmebedarf der Industrie relevant, um die erneuerbaren Potenziale der Fernwärme anteilig in der Industrie berücksichtigen zu können. Die Fernwärme-Anteile in der energieintensiven Industrie wurden auf Basis von Analysen heutiger Anteile für die Grundstoffchemie, Papier und Raffinerien über eigene Modellierungen abgeschätzt und über beide Szenarien identisch und mit 33 % bis 2050 als konstant angenommen. Durch einen Abgleich mit den Energiedaten des Landes NRW, konnte der Wert plausibilisiert werden und wurde daher als praxisnah eingestuft [vgl. LANUV, 2021]. Tabelle 28 zeigt die verwendeten Daten.

Tabelle 28: Fortschreibung Fernwärmebedarf und Fernwärmeerzeugung bis 2050

		80 %-Szenario			Kn-Szenario		
		2030	2040	2050	2030	2040	2050
Allgemeine Versorgung	Wärmebedarf* (RW+WW) WG/NWG [GWh/a]	189.922	156.838	118.845	173.545	134.975	92.321
	<i>FW-Anteil</i>	11,5 %	13,8 %	19,2 %	14,3 %	18,4 %	24,6 %
	Wärmebedarf (PW) PW3/PW4/NWG [GWh/a]	13.581	15.181	14.881	11.865	11.526	11.002
	<i>FW-Anteil</i>	6,5 %	6,1 %	14,0 %	7,7 %	10,4 %	16,7 %
	Summe FW-Bedarf [GWh/a]	22.714	22.536	24.908	25.658	25.985	24.545
	<i>Netzverluste</i>	11,5 %	11 %	10,5 %	11 %	10,5 %	10 %
	FW-Erzeugung [GWh/a]	25.665	25.322	27.830	28.829	29.034	27.272
Energie- intensive Industrie	Wärmebedarf (PW+RW) [GWh/a]	42.882	41.432	38.444	38.649	34.944	32.504
	<i>FW-Anteil</i>	33 %	33 %	33 %	33 %	33 %	33 %
	FW-Bedarf [GWh/a]	14.151	13.672	12.687	12.754	11.532	10.726
	<i>Netzverluste</i>	11,5 %	11 %	10,5 %	11 %	10,5 %	10 %
	FW-Erzeugung [GWh/a]	15.990	15.362	14.175	14.331	12.884	11.918

* Der hier dargestellte Wärmebedarf beinhaltet fälschlicherweise auch den Raumwärmebedarf der PW-Gruppe 1+2. Dies hat zur Folge, dass die FW-Erzeugung minimal überschätzt wird. Da es sich hierbei um eine Überschätzung von lediglich 0,6 % handelt, diese also keine relevante Auswirkung auf die zentralen Ergebnisse und die damit verbundenen Kernaussagen hat, wurde auf eine aufwendige nachträgliche Korrektur der Ergebnisse verzichtet.

Die hier dargestellten Werte zeigen eindringlich, welche bedeutende Rolle die Fernwärme bei der Wärmeversorgung in NRW einnehmen wird. In Abbildung 21 ist die Summe des Fernwärmebedarfs dem Ist-Stand (2016) gegenübergestellt. Der FW-Bedarf steigt demnach bis zum Jahr 2030 auf 38 TWh und sinkt bis 2050 auf 35 TWh. Im gleichen Zuge steigt jedoch, aufgrund des stark sinkenden Wärmebedarfs, der Fernwärmeanteil am Wärmebedarf bis zum Jahr 2050 auf 26 %. Maßgeblich ist hier der modellierte Wärmebedarf des LANUV.

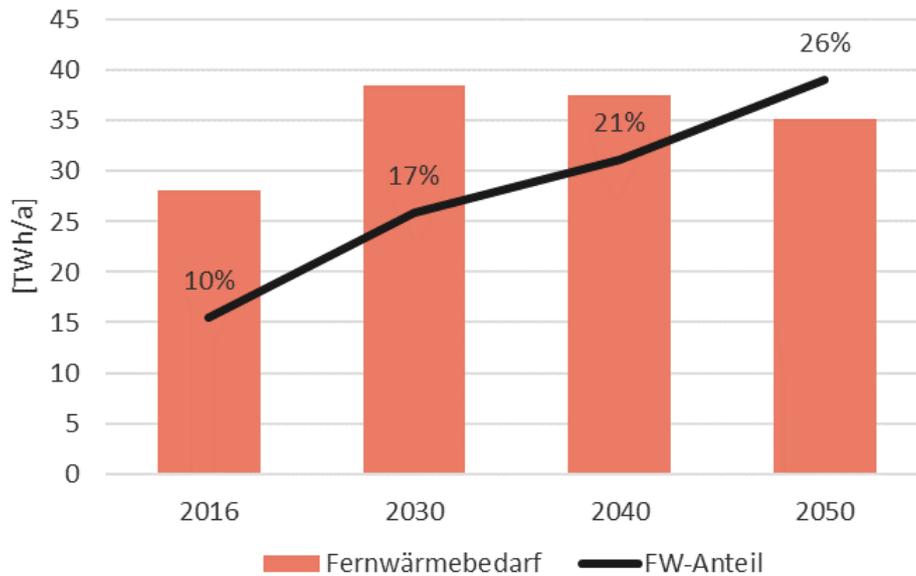


Abbildung 21: Entwicklung des Fernwärmebedarfs und des Anteils am Gesamtwärmebedarf

CO₂-Kontingent

Die relativen Reduktionspfade des CO₂-Kontingentes für die allgemeine Wärmeversorgung in den drei Szenarien basieren auf den Treibhausgasentwicklungen aus der BDI-Studie [BCG & PROGNOSE, 2018]. Hierzu wurden die relativen CO₂-Minderungen der BDI-Studie der Stützjahre 2040 und 2050 auf das Gesamtemissionsbudget der Szenarien für NRW im Jahr 2030 skaliert (Abbildung 22). Das Gesamtemissionsbudget des Startsystems im Jahr 2030 wird durch den Technologiemix bestimmt, der 2030 zur Deckung der szenariospezifischen Wärmebedarfe der Fernwärme notwendig ist.

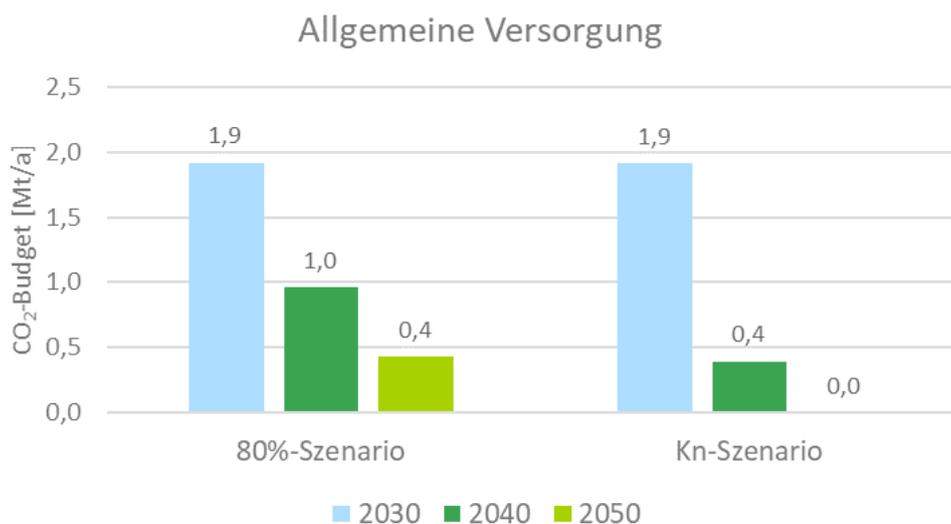


Abbildung 22: Entwicklung des CO₂-Gesamtbudgets für die allgemeine Versorgung

Im 80 %- und Klimaneutral-Szenario ist das CO₂-Budget im Jahr 2030 noch gleich hoch. Anschließend sinkt das CO₂-Budget im Klimaneutral-Szenario deutlich, sodass dieser Wert 2040 lediglich 20 % des Jahres 2030 beträgt. Im Jahr 2050 werden die Emissionen dann vollständig vermieden.

In der Industrie ist im Gegensatz zur allgemeinen Versorgung der Wärmebedarf im Klimaneutral-Szenario im Jahr 2030 um ca. 15 % geringer als im 80 %-Szenario (Abbildung 23). Die Reduktion verläuft von 2030 auf 2040 weniger steil als in der allgemeinen Versorgung, da weiterhin Bedarf an Hochtemperaturwärme besteht, deren fossile Erzeugung in der mittleren Dekade sich nur zu höheren Kosten als in der niedertemperierten Fernwärme der allgemeinen Versorgung dekarbonisieren lässt.

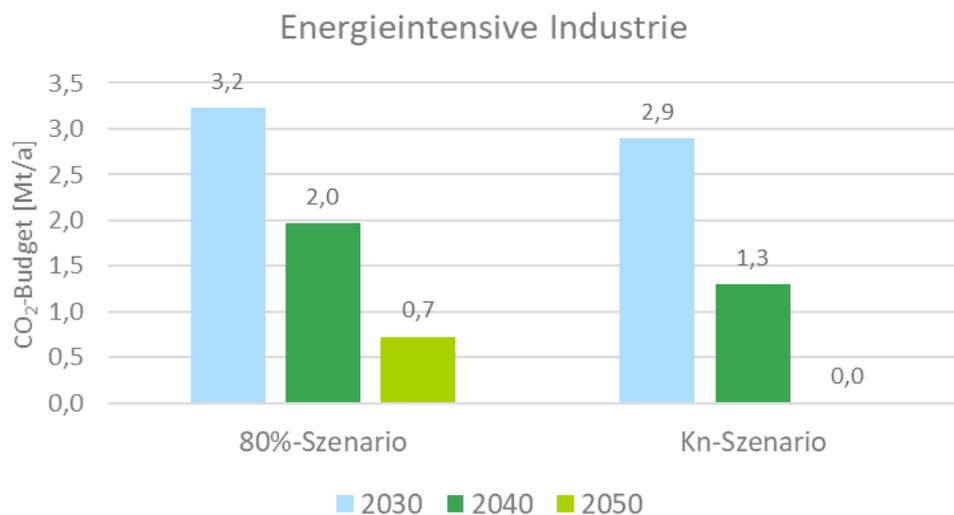


Abbildung 23: Entwicklung des CO₂-Gesamtbudgets für die energieintensive Industrie

Sonstige Inputwerte

Für die weitere Analyse bei den Zielsystemen wurden weitere Inputdaten und Rahmenbedingungen verwendet, die im Folgenden qualitativ vorgestellt werden. Diese beruhen auf den Quellen wie angegeben und wurden durch eigene Annahmen oder durch Input aus der projektbegleitenden Arbeitsgruppe ergänzt:

- CO₂-Faktoren [UBA, 2017; IFEU, 2014; BCG & PROGNOSE, 2018]
 - Ohne Berücksichtigung der jeweiligen Vorkette der Energieträger (Ausnahme: Strom und Wasserstoff, beide sind von den Emissionen der Stromerzeugung in Deutschland abhängig)
 - Für Wasserstoff wurde angenommen, dass dieser zu 30 % mit dem deutschen Strommix und zu 70 % über Import und Direkterzeugung an EE-Anlagen in Deutschland bereitgestellt wird (Nutzungsgrad des Elektrolyseurs: 70 %)
- Jahresnutzungsgrade
 - Geht aus den für diese Studie erstellten Steckbriefen hervor (vgl. Kapitel 3.1)

- Vollbenutzungsstunden
 - Aufgrund der erwarteten stärkeren Rolle der KWK-Technologien zur flexiblen Bereitstellung von Residualstrommengen durch steigende Anteile fluktuierender Erneuerbarer Energien, wird in der allgemeinen Versorgung von einer Reduktion der Vollbenutzungsstunden bis 2050 ausgegangen
 - In der Industrie wird dieser Faktor weniger stark gewichtet
- Ölpreis [ZUKUNFTSHEIZEN, 2021]
 - Basiert auf dem Einkaufspreis zzgl. der Energiesteuer sowie Lagerungs- und Transportkosten
 - Aufgrund stark sinkender Nachfrage wird eine leichte Reduktion des Preises im Klimaneutral-Szenario angenommen, dem durch den steigenden CO₂-Preis entgegengewirkt wird
- Gaspreis [BNETZA, 2019; BCG & PROGNOSES, 2018; EWI, 2017]
 - Zusätzlich zu den Erzeugerpreisentwicklungen sind Aufschläge für Netzentgelte berücksichtigt
 - Der Erdgaspreis weist im Klimaneutral-Szenario eine leicht steigende Tendenz auf
- Wasserstoffpreis
 - Der Wasserstoffpreis wurde in den Szenarien entwickelt (vgl. Kapitel 4.3) und nimmt bis zum Jahr 2050 ab
 - Es wird davon ausgegangen, dass dieser zukünftig nicht mit Steuern, Abgaben und Umlagen belastet wird
- Strompreis [BCG & PROGNOSES, 2018; BDEW, 2019; PROGNOSES ET AL., 2014; BNETZA, 2019]
 - Ausgangswert ist der gemittelte Börsenstrompreis am Spotmarkt (base) zzgl. Steuern, Abgaben und Umlagen
 - Der Strompreis nimmt von 2030 bis 2040 zunächst ab und bleibt dann bis 2050 weitestgehend konstant. Die Abnahme des Strompreises wird für die allgemeine Versorgung etwas höher eingeschätzt als für die Industrie
- Biogaspreis [BCG & PROGNOSES, 2018]
 - Es wird von einer leichten Preissteigerung bis 2040 ausgegangen. Bis 2050 wird der Biogas-Preis dann aber wieder fallen
 - Unter der Annahme, dass Biogas zu einem hohen Anteil über die bestehende Erdgasinfrastruktur transportiert wird, gelten die Netznutzungsentgelte des Erdgasnetzes

- Wärmegestehungskosten [PROGNOS ET AL., 2019; KURZWEIL, 2013; IZES, 2016; AMMERMANN ET AL., 2015; IEA, 2019]
 - Ermittelt aus den angegebenen Randbedingungen (z. B. CO₂-Preis), Energiepreisen, KWK-Vergütungssätzen aus dem KWKG 2020 und spezifischen Investitionskostenansätzen
 - Die höchsten Wärmegestehungskosten weisen dabei im Klimaneutral-Szenario wasserstoffbasierte Anlagen (BHKW, GuD, Brennstoffzelle) auf

4.9 Zusammenfassung

Die Ergebnisse dieser Studie werden in zwei unterschiedlichen Szenarien dargestellt. Das maßgebliche Szenario ist dabei das Klimaneutral-Szenario, welches eine vollkommen dekarbonisierte Wärmeversorgung bis 2050 vorsieht. Als Vergleichsszenario gilt das 80 %-Szenario, bei dem die derzeitigen Klimaschutzbemühungen nur leicht verschärft werden.

Für die beiden Szenarien wurde der Raumwärme- und der Prozesswärmebedarf fortgeschrieben. Hierbei ist zu erkennen, dass vor allem der Raumwärmebedarf (inkl. Warmwasser) der Gebäude bis zum Jahr 2050 im Klimaneutral-Szenario deutlich von 218 TWh/a auf 92 TWh/a sinkt. Auch der Prozesswärmebedarf (< 500 °C) sinkt im gleichen Zeitraum, wenn auch nur lediglich von 55 TWh/a auf 43 TWh/a. In Summe sinkt der komplette Wärmebedarf in NRW dementsprechend um knapp die Hälfte bis zum Jahr 2050. Auch der Raumkältebedarf wurde bis 2050 prognostiziert. Dieser steigt aufgrund der zunehmenden Hitzebelastung in den Städten zwar an, nimmt aber weiterhin im Vergleich zum Wärmebedarf eine untergeordnete Rolle ein.

Als zentrale Eingangsgröße für die Zielsysteme wurden zudem die Potenziale der erneuerbaren und klimafreundlichen Energieträger ermittelt. Diese werden bei der zukünftigen Wärmeversorgung eine zentrale Rolle einnehmen. Mit ca. 6 TWh/a dominiert im Jahr 2050 (Kn-Szenario) bei der Allgemeinen Versorgung dabei die industrielle Abwärme, aber auch die große Solarthermie, die Biomasse und die Abfallverbrennung nehmen einen großen Anteil ein, mit leichten Abstrichen auch das Warme Grubenwasser. Dabei steigt der Anteil an der Fernwärmeerzeugung bis zum Jahr 2050 auf 64 % an. In der energieintensiven Industrie nehmen die erneuerbaren und klimafreundlichen Energieträger mit 19 % eine kleinere Rolle am Wärmebedarf ein. Hier dominiert mit 3 TWh/a die Biomasse.

Mit zwei Workshops zur allgemeinen Versorgung und zur Industrie wurde zudem das Wissen und die Erfahrung vielfältiger Fachleute aus der Praxis in diese Studie mit eingebunden. Hierdurch konnten wertvolle Informationen gewonnen werden, die u. a. bei der Festsetzung von Inputparametern und Rahmenbedingungen berücksichtigt wurden. Es wurde bei den Workshops aber auch deutlich, dass die Bandbreite der möglichen Zukunftsbilder hinsichtlich der Wärmeversorgung groß ist, jedoch Einigkeit bei einigen grundlegenden Tendenzen besteht, wie des deutlichen Zuwachses der Wärmepumpentechnologie.

Zudem wurden weitere wichtige Inputwerte und Rahmenbedingungen, wie z. B. der Anteil der Fernwärme oder das vorhandene CO₂-Budget festgesetzt. Diese Annahmen beruhen auf unterschiedlichen Datenquellen kombiniert mit eigenen Erfahrungen und des Inputs aus der projektbegleitenden Arbeitsgruppe.

5 Berechnung des technischen Potenzials

Im Folgenden Kapitel wird das Potenzial der KWK sowie der Energiemix der Allgemeinen Wärmeversorgung und der energieintensiven Industrie beschrieben und dargestellt.

5.1 Aufbau und Funktion von Zielsystemen

Um das technische Potenzial bestimmen zu können, wurden aufbauend auf den Szenarien Zielsysteme für die drei Stützjahre 2030, 2040 und 2050 entwickelt. Diese haben die Funktion, einen Mix an Lösungen und Technologien zur Wärmebereitstellung in NRW zu beschreiben. Sie bauen auf den Rahmenbedingungen des jeweiligen Szenarios und den darüber hinaus festgelegten Eingangsdaten auf. Die Zielsysteme wurden für die allgemeine Versorgung (Fernwärme) und die energieintensive Industrie in NRW entwickelt. Dabei wurden nicht nur KWK-Technologien berücksichtigt, sondern eine Bandbreite von künftig zu erwartenden Technologien, welche Tabelle 29 zu entnehmen sind.

Tabelle 29: Überblick über die betrachteten Erzeugungstechnologien und Energieträger

Energieträger	Technologie
Erdgas	BHKW, GT + AHK, GuD, Kessel (Grund- und Spitzenlast)
Stein- und Braunkohle	Kessel + DT
Wasserstoff	BHKW, GuD, Brennstoffzelle, Kessel (Spitzenlast)
Bioenergie	Kessel + DT, Kessel, BHKW
Abfall	Kessel + DT
Strom	Kessel (Spitzenlast)
Warmes Grubenwasser	Wärmepumpe
Sonstige Umweltwärme	Wärmepumpe
Industrielle Abwärme	Direkte Nutzung
Große Solarthermie	Direkte Nutzung
Deponie-, Gruben-, Klärgas	BHKW
Öl	Kessel (Spitzenlast)

5.2 Methodische Vorgehensweise

Die Zielsysteme wurden je Szenario und Zeitscheibe für ganz NRW entwickelt, unterteilt nach (vgl. Abbildung 24):

- leitungsgebundene allgemeine Versorgung (Nah- und Fernwärme) (Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme-Gruppen 3+4) und
- energieintensive Industrie (Prozesswärme Gruppen 1+2 inkl. Raumwärme) (vgl. Einteilung der Prozesswärmegruppen in Kapitel 2.1.3).

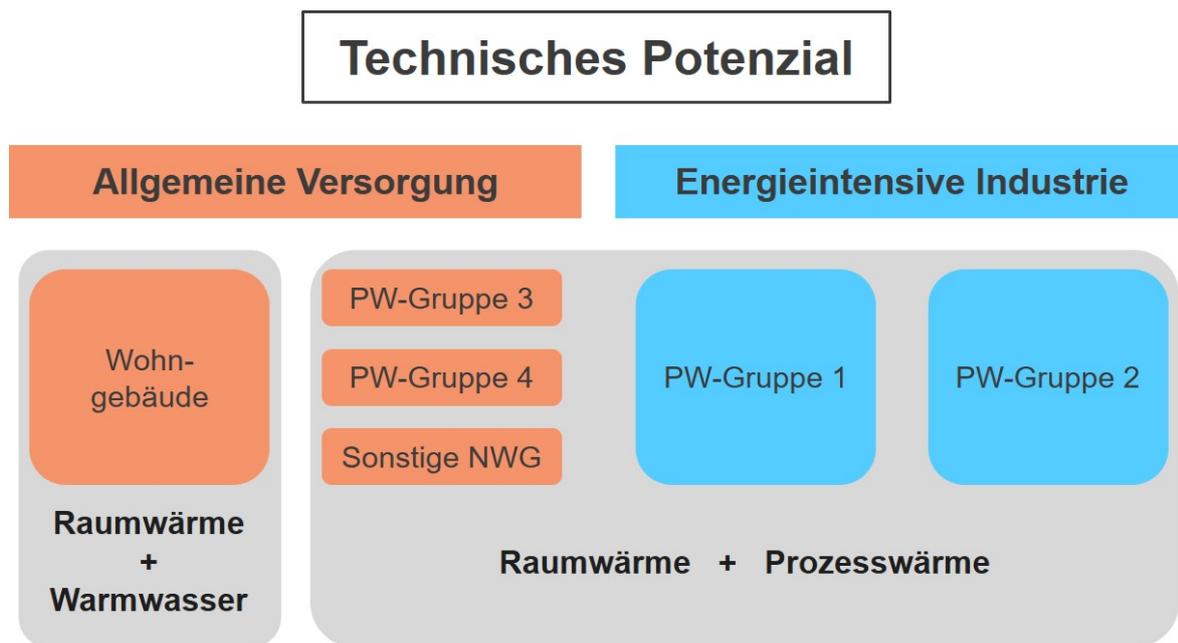


Abbildung 24: Darstellung der betrachteten Zielsysteme

Die Summe der Wärmeerzeugung aller Technologien musste dem Wärmebedarf der zugehörigen Zeitscheibe entsprechen. Einigen klimafreundlichen Energien wurde dabei eine feste Wärmeerzeugung aus den Eingangsdaten zugeordnet, daher ist hier die Kenntnis über deren Wärmegestehungskosten nicht relevant (vgl. Kapitel 4.6). Die Wärmeerzeugung der verbleibenden Technologien wurde entsprechend der wirtschaftlichen Merit Order (Einsatzreihenfolge) berechnet, d. h. die Einsatzreihenfolge der Wärmeerzeuger richtet sich nach den ermittelten Wärmegestehungskosten. Dabei wird zwischen Spitzenlasterzeugern, deren Wärmeerzeugung in allen Szenarien auf 3 % des Fernwärmebedarfs festgelegt wurde, und Grundlasterzeugern unterschieden sowie die Merit-Order differenziert betrachtet.

Je Technologie wurden die resultierenden CO₂-Emissionen berechnet. Für KWK-Technologien wurden mittels der Carnot-Methode die wärmespezifischen Allokationsfaktoren angewendet, d. h. der Anteil des Brennstoffs, der für die Wärmeerzeugung benötigt wird. Die Summe der resultierenden CO₂-Emissionen durfte das CO₂-Kontingent des jeweiligen Jahres und Szenarios nicht übersteigen. Kam es zu einer Überschreitung des Kontingents, wurden durch entsprechende Korrekturfaktoren die Wärmeerzeugungsanteile der Technologien antiproportional zu deren spezifischen CO₂-Emissionen herabskaliert, bis

das CO₂-Emissions-Kontingent eingehalten wurde. Die Wärmeerzeugung aus Technologien mit hohen spezifischen CO₂-Emissionen nahm dadurch ab.

Für die Zeitscheiben 2040 und 2050 galt zudem, dass die Wärmeerzeugung aus Anlagen, die schon im Zielsystem 2030 enthalten waren, also zwischen 2020 und 2030 realisiert werden, in Abhängigkeit von der jeweils angesetzten Nutzungsdauer auch in 2040 anteilig berücksichtigt wurden. Genauso werden Anlagen, die zwischen 2030 und 2040 realisiert werden und demnach im Zielsystem 2040 Bestand haben, anteilig in 2050 berücksichtigt. Dies bedeutet bei einer Nutzungsdauer von 15 Jahren, die z. B. für BHKW, GuD und Wärmepumpe angenommen wurde, werden 50% der Wärmeerzeugung der Vordekade in der betrachteten Zeitscheibe berücksichtigt und 100% bei einer Nutzungsdauer von 20 Jahren, die für alle Kessel ohne KWK gilt. Dadurch wurde sichergestellt, dass Bestandsanlagen im Rahmen ihrer Nutzungsdauer Vorrang gegenüber Neuanlagen haben. Es fand jedoch eine Anpassung der Wärmeerzeugung über das Verhältnis der Vollbenutzungsstunden beider Zeitscheiben statt. Der verbleibende zu deckende Wärmebedarf wurde wie vorher beschrieben über die Technologien mittels Merit-Order der Zeitscheibe gedeckt.

Die Zielsysteme orientieren sich an der Deckung des Wärmebedarfs, jedoch wurde für die KWK-Technologien auch jeweils die Stromerzeugung berechnet. Außerdem wurde die Stromaufnahme für die PtX-Technologien ermittelt, d. h. für Power-to-Heat-Anwendungen sowie die Rückverstromung von Wasserstoff in KWK-Technologien und Spitzenlastkessel. Folgende Randbedingungen für den Umwandlungsprozess von Strom über Wasserstoff zu Wärme wurden dabei angesetzt:

- Nutzungsgrad des Elektrolyseurs: 70%
- thermischer Nutzungsgrad der Technologien zur Wasserstoff-Rückverstromung:
 - BHKW: 46%
 - GuD: 53%
 - Brennstoffzelle: 25%
 - Kessel: 90%

Im Gegensatz zur allgemeinen Versorgung hat die energieintensive Industrie zum Teil hohe Temperaturanforderungen, die nicht über alle betrachteten Technologien bedient werden können. Daher wurden der Wärmebedarf der energieintensiven Industrie und die resultierenden Wärmeerzeugungsanteile, in zwei Kategorien kleiner und größer 150 °C eingeteilt. Technologien, die Wärme nur bis zu einem Niveau von ca. 150 °C erzeugen können, können nicht zur Deckung des Wärmebedarfs oberhalb dieser Temperaturgrenze eingesetzt werden. Diese waren BHKW, Wärmepumpen, industrielle Abwärme und große Solarthermie. Während bei BHKW die Heißwassererzeugung bei maximal ca. 150 °C liegt und bei Dampferzeugung mit steigendem Temperaturniveau der Wirkungsgrad sinkt, kann die Wärmepumpe in der Regel nur Temperaturen < 100 °C bereitstellen. Jedoch gibt es hier auch schon marktreife Anwendungen für Hochtemperatur-Technologien im Bereich > 100 °C. Die industrielle Abwärme und die große Solarthermie werden nur über die externe Lieferung von Fernwärme berücksichtigt (s. Kapitel 4.6).

5.3 Ergebnisse der Zielsysteme in den Szenarien

Mit den in den vorigen Kapiteln angenommen Rahmenbedingungen für die Szenarien und die weiteren dargestellten Parameter und Annahmen, wurden die Zielsysteme entwickelt. Im Folgenden werden die detaillierten Ergebnisse für das 80 %- und das Klimaneutral-Szenario vorgestellt. Wie in Kapitel 4.2 beschrieben wird das Referenz-Szenario aufgrund geänderter Zielsetzungen in den Ergebnissen nicht diskutiert. Für die beiden verbleibenden Szenarien werden für alle drei Stützjahre folgende Ergebnisse dargestellt, jeweils für die allgemeine Versorgung und für die energieintensive Industrie:

- Wärmeerzeugungsanteile je Technologie
- KWK-Mengen und KWK-Anteile
- Stromerzeugungsanteile der KWK-Technologien
- Stromaufnahme der PtX-Anwendungen (inkl. Vorkette)

5.3.1 80 %-Szenario

Das 80 %-Szenario zeichnet eine Welt bis 2050, die leichten Verschärfungen der derzeit gültigen Klimaschutzmaßnahmen unterliegt.

Allgemeine Versorgung

Im 80 %-Szenario ist in der allgemeinen Versorgung ab dem Jahr 2040 bereits ein Anteil von 21 % Wasserstoff zum Einhalten des CO₂-Budgets notwendig (Abbildung 25). Während 2040 bei der Wärmepumpe aufgrund noch relativ hoher CO₂-Emissionen des Stroms aus dem öffentlichen Netz (Annahme: 100% Netzstrombezug) ökologische Nachteile gegenüber Wasserstoff (Annahme: 70% des Strombedarfs kommt aus CO₂-freier, erneuerbarer Stromerzeugung über Import oder Direkterzeugung) bestehen, verliert dieser Nachteil bis 2050 durch die Verringerung der spezifischen Emissionen der Stromerzeugung an Relevanz. Bei diesen geringen Stromemissionen überwiegen die Gesamteffizienzvorteile der Wärmepumpe gegenüber Wasserstoff und folglich verringert sich der Anteil von Wasserstoff im Jahr 2050 gegenüber 2040.

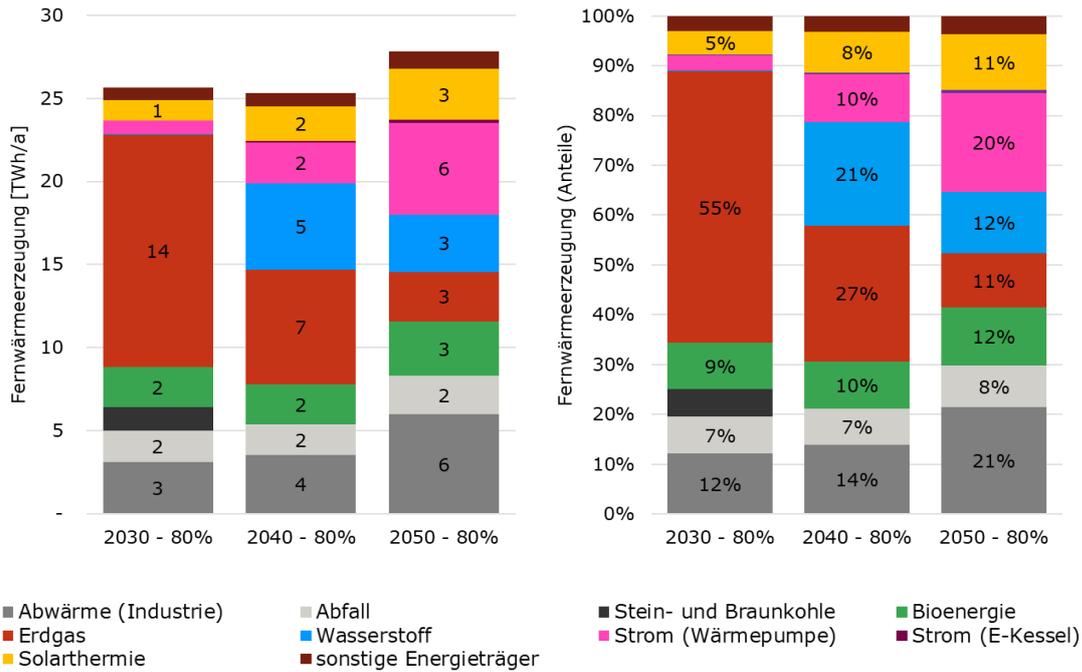


Abbildung 25: Absolute und relative Energieträgeranteile für die allgemeine Versorgung – 80 %-Szenario

Im Jahr 2050 werden die Klimaschutzanforderungen durch einen Rückgang des Erdgasanteils auf 11 % eingehalten, was einer Reduktion um 80 % gegenüber 2030 entspricht. Der absolut steigende Bedarf an Fernwärme bis 2050 wird durch eine vermehrte Nutzung industrieller Abwärme (6 TWh/a im Jahr 2050) sowie einer Verdreifachung des Wärmepumpenanteils gedeckt. Auch der Anteil der Solarthermie und der Bioenergie steigt kontinuierlich bis 2050.

Der KWK-Anteil (Abbildung 26) liegt im Jahr 2030 im 80 %-Szenario bei 69 % und fällt bis 2050 auf 43 %.

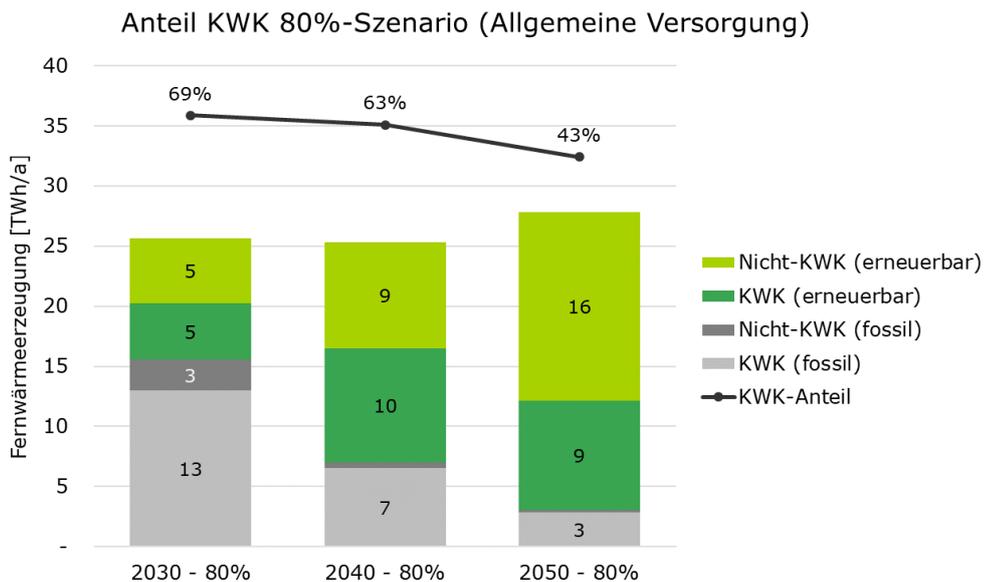


Abbildung 26: KWK-Anteile allgemeine Versorgung – 80 %-Szenario

Die Reduktion der Erdgas-KWK wird bis 2040 zunächst durch die Zunahme von Wasserstoff-KWK teilweise kompensiert. Dadurch bleibt der KWK-Anteil auf etwa gleichbleibendem Niveau. Der Rückgang der KWK-Wärme vollzieht sich im 80 %-Szenario besonders nach 2040, da sowohl Erdgas-KWK als auch bis 2040 umgerüstete bzw. neue Wasserstoff-KWK-Anlagen, unter Berücksichtigung ihrer Nutzungsdauer von angenommenen 15 Jahren, durch Nicht-KWK-Erzeuger (insbesondere Wärmepumpen) verdrängt werden.

Die KWK-Stromerzeugung (Abbildung 27) verdeutlicht den Fuel-Switch von fossilen Erdgas- und Kohle-KWK-Anlagen auf Wasserstoff-KWK im Jahr 2040.

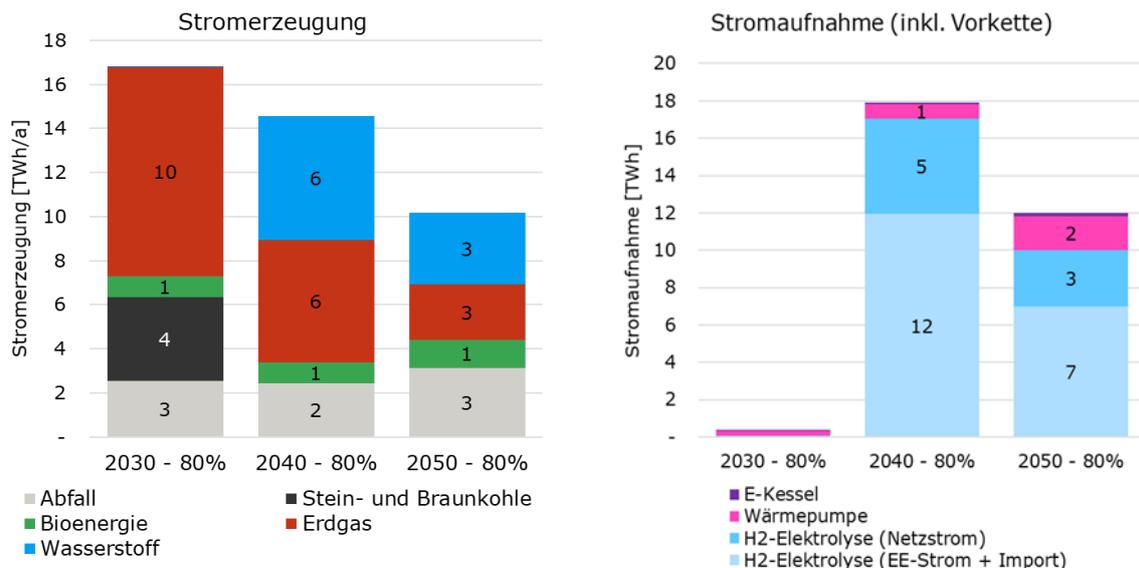


Abbildung 27: Stromezeugung (KWK) und -aufnahme in der allgemeinen Versorgung – 80 %-Szenario

Durch die Zunahme Erneuerbarer Energien an der Gesamtstromerzeugung sinken die Anzahl und Einsatzzeiten der KWK-Kraftwerke und folglich die Stromerzeugungsmengen im Jahr 2050 um rund 40 % gegenüber 2030. Ebenso sinkt die damit verbundene installierte elektrische Leistung von 7 GW im Jahr 2030 auf 6 GW (2040) bzw. 4,7 GW (2050). Die hohe Wärme- und Stromerzeugung aus Wasserstoff-betriebenen Anlagen im Jahr 2040 erfordert eine hohe Stromaufnahme für die synthetische Gasproduktion (PtG). Die anschließende Verdrängung von Wasserstoff-KWK durch Wärmepumpen zeigt sich ebenfalls im Rückgang des benötigten Stroms für Wasserstoff-Elektrolyseure im Jahr 2050 gegenüber 2040.

Energieintensive Industrie

Die Wärmeerzeugung bzw. der Wärmebedarf der Industrie sinkt entsprechend der Rahmenbedingungen des 80 %-Szenarios bis 2050 (Abbildung 28). Die Entwicklung der Wärmeerzeugung in der Industrie im 80 %-Szenario ist vergleichbar mit der allgemeinen Versorgung desselben Szenarios. Der Erdgasanteil wird von 2030 bis 2040 etwa halbiert und durch Wasserstoff sowie zu rund 8 % durch Wärmepumpen ersetzt. 2050 wird 10 % der Wärme weiterhin fossil durch Erdgas erzeugt. Der Anteil der Wärmepumpen vervierfacht sich nahezu gegenüber 2040, da für die Industrie nur wenig Potenzial alternativer klimafreundlicher

Erzeuger zur Verfügung steht. Wärmepumpen haben auch hier, wie bei der allgemeinen Versorgung, einen ökologischen Nachteil gegenüber der Wasserstoff-Wärmeerzeugung, der jedoch mit sinkenden CO₂-Emissionen im Stromnetz bis 2050 kleiner wird.

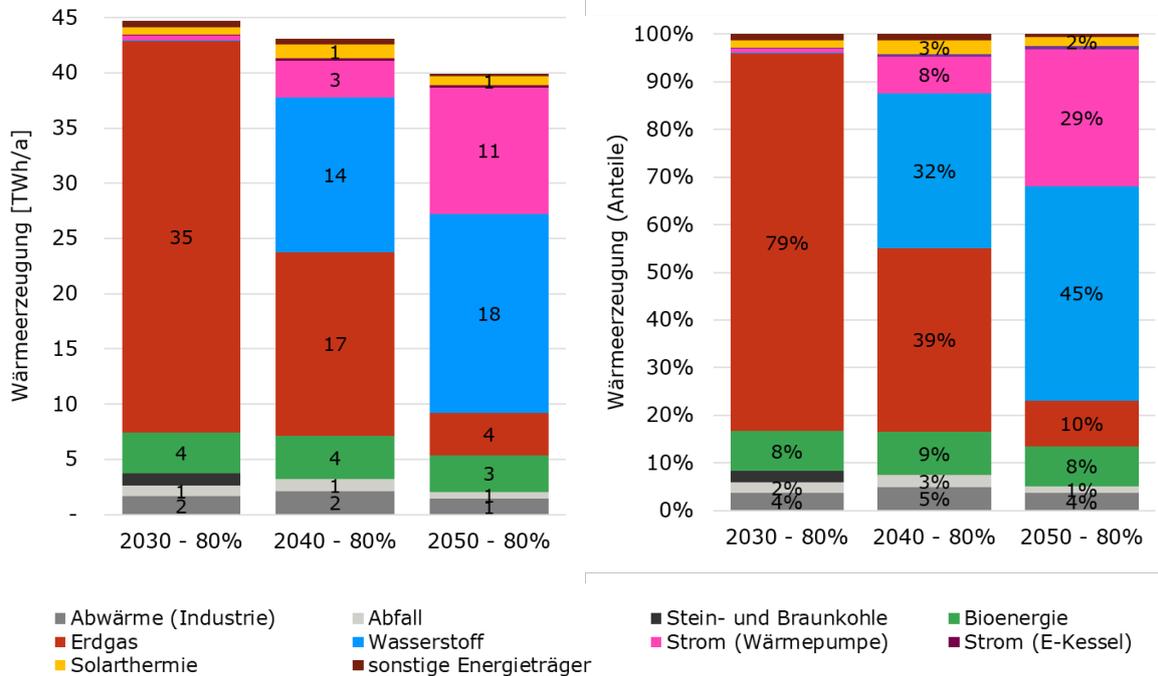


Abbildung 28: Absolute und relative Energieträgeranteile in der energieintensiven Industrie – 80 %-Szenario

Anders als bei der allgemeinen Versorgung besteht in der energieintensiven Industrie jedoch ein Wärmebedarf bei Temperaturen über 150 °C. Zur Deckung dieses Hochtemperatur-Wärmebedarfs werden primär Wasserstoff- und geringfügig Erdgas-GuD eingesetzt. Aufgrund dieser Temperaturanforderungen ist nicht von einem Rückgang der Wasserstoffmengen in der Industrie im 80 %-Szenario zur Dekade 2050 auszugehen. Zudem bestehen für einige energieintensive Industrien wie Stahlherstellung und Chemie, die auf Wasserstoff als Ausgangsstoff des Produktionsprozesses angewiesen sind, Synergieeffekte hinsichtlich bereits vorhandener oder zukünftig erforderlicher Infrastrukturen zum Einsatz der KWK-Wärmeerzeugung in Industriekraftwerken [vgl. MWIDE, 2020].

In der KWK-Wärmeerzeugung wird insbesondere durch den Einsatz von Wasserstoff eine große Zunahme der regenerativen KWK bis 2040 ersichtlich, deren Anteil bis 2050 noch leicht ansteigt (Abbildung 29). Der KWK-Anteil an der Gesamtwärmeerzeugung sinkt durch den vermehrten Einsatz der Wärmepumpen und die verringerte Nutzung von Erdgas bis 2050 gegenüber 2030 dennoch um insgesamt 20 %.

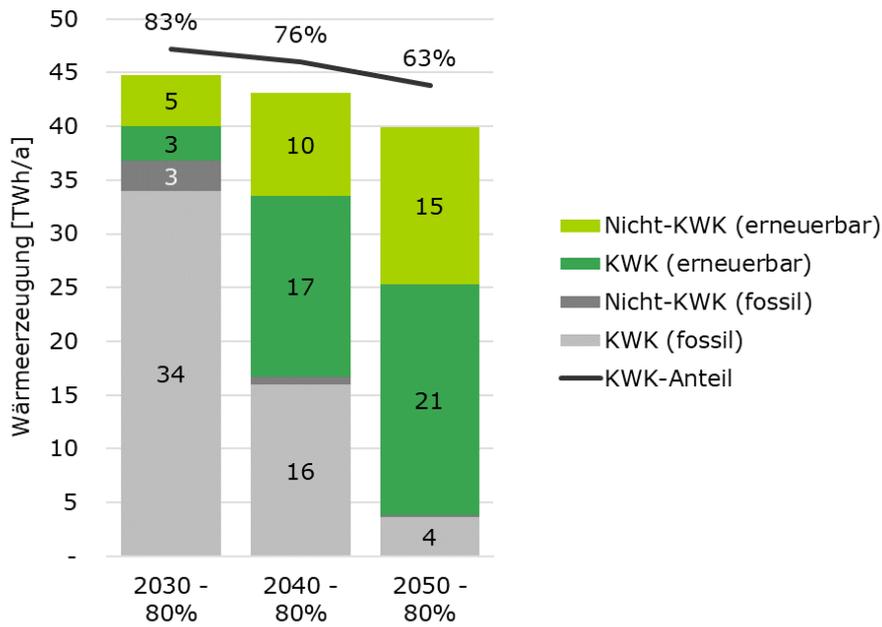


Abbildung 29: KWK-Anteile energieintensive Industrie – 80 %-Szenario

Die Summe der KWK-Stromerzeugung weist in der Industrie im 80 %-Szenario insgesamt keine signifikante Veränderung im Jahr 2040 zu 2030 auf, sinkt 2050 jedoch um rund 22 % (Abbildung 30). Auch die installierte elektrische Leistung sinkt dementsprechend von 6,5 GW (2030) auf 5,1 GW im Jahr 2050.

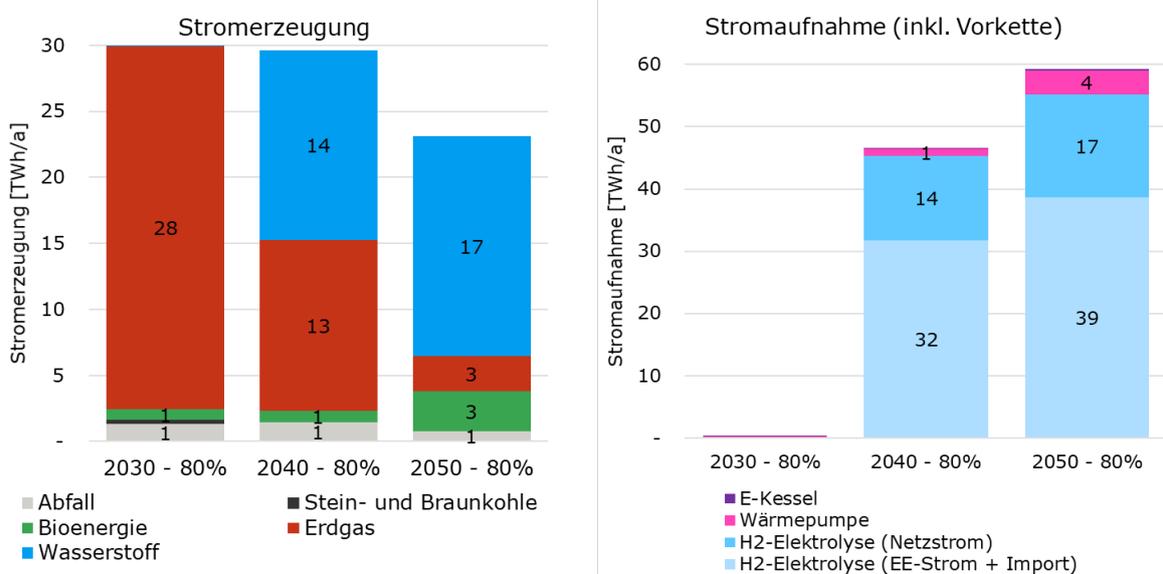


Abbildung 30: Stromerzeugung (KWK) und -aufnahme in der energieintensiven Industrie – 80 %-Szenario

Der größte Anteil der industriellen KWK-Stromerzeugung in NRW wird ab 2040 unter den gegebenen Randbedingungen durch Wasserstoff-KWK-Anlagen erfolgen. Aus diesem Grund ist die Stromnachfrage zur Produktion von Wasserstoff in der Industrie im Jahr 2050 mehr als fünfmal so hoch wie die Nachfrage in der allgemeinen Versorgung.

5.3.2 Klimaneutral-Szenario

Das Klimaneutral-Szenario bedingt eine Reduktion auf Netto-Null-Emissionen im Jahr 2050 in der Wärmeerzeugung und stellt damit die höchsten Anforderungen an den Energieträgermix bereits ab 2040.

Allgemeine Versorgung

Für die allgemeine Versorgung wurde im Klimaneutral-Szenario mit rund 29 TWh/a im Jahr 2030 die absolut höchste Fernwärmeerzeugung der drei Szenarien angenommen, die jedoch bis 2050 um rund 1,8 TWh absinkt und damit auf ähnlichem Niveau wie im 80 %-Szenario liegt (Abbildung 31).

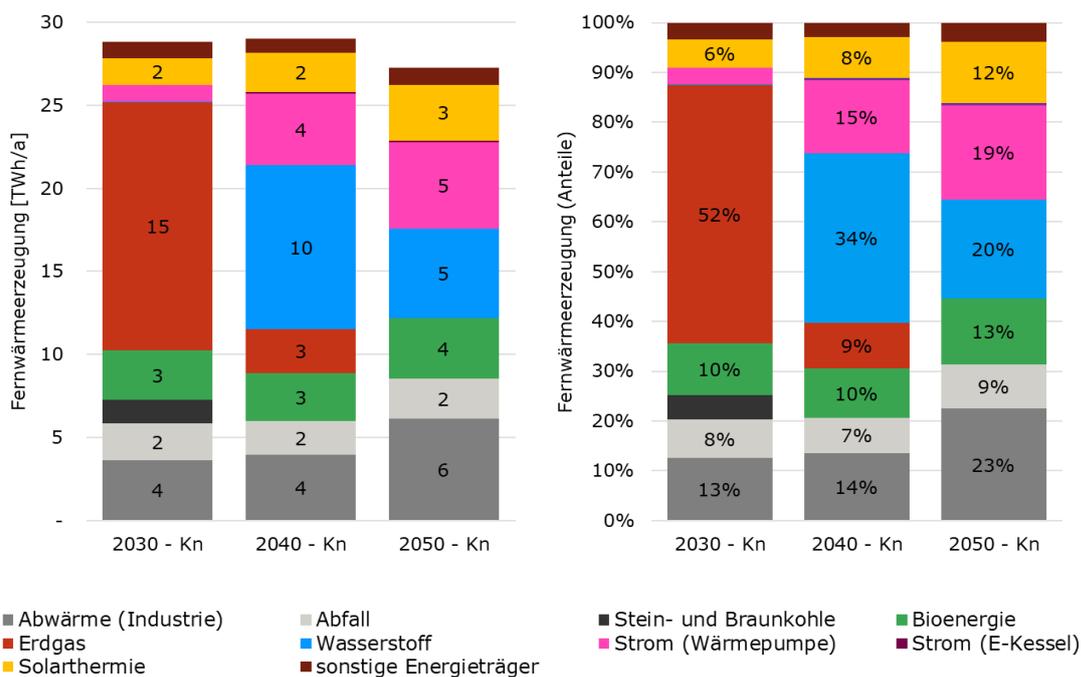


Abbildung 31: Absolute und relative Energieträgeranteile für die allgemeine Versorgung – Kn-Szenario

Durch den ambitionierten CO₂-Reduktionspfad wird bereits bis 2040 80 % der Erdgas-KWK insbesondere durch Wasserstoff (10 TWh/a) und Wärmepumpen (4 TWh/a) verdrängt. Wasserstoff hat hier einen größeren Anteil, da dessen spezifische CO₂-Emissionen durch den hohen angesetzten Anteil an erneuerbarem Strom geringer sind als die der Wärmepumpe mit reinem Netzstrombezug. Bis 2050 steigt die Erzeugung durch Wärmepumpen auf 5 TWh/a, Wasserstoff hingegen halbiert sich auf 5 TWh/a. Zum einen liegt dies an dem insgesamt sinkenden Fernwärmebedarf, zum anderen, wie auch im 80 %-Szenario, an den

Gesamteffizienzvorteilen der Wärmepumpe gegenüber Wasserstoff. Dieser Effizienzvorteil überwiegt jedoch erst mit spezifischen CO₂-Emissionen von 0 g/kWh_{el} im Jahr 2050. Ein weiterer Verdrängungseffekt ergibt sich durch die verstärkte Nutzung der industriellen Abwärme mit 6 TWh/a. Die Klimaschutzanforderungen bis 2050 erfordern einen vollständigen Rückgang fossiler Energieträger, sodass bis 2050 die Wärmeerzeugung zu 100 % regenerativ erfolgt.

Die KWK-Anteile liegen im Klimaneutral-Szenario auf ähnlichem Niveau wie im 80 %-Szenario (Abbildung 32).

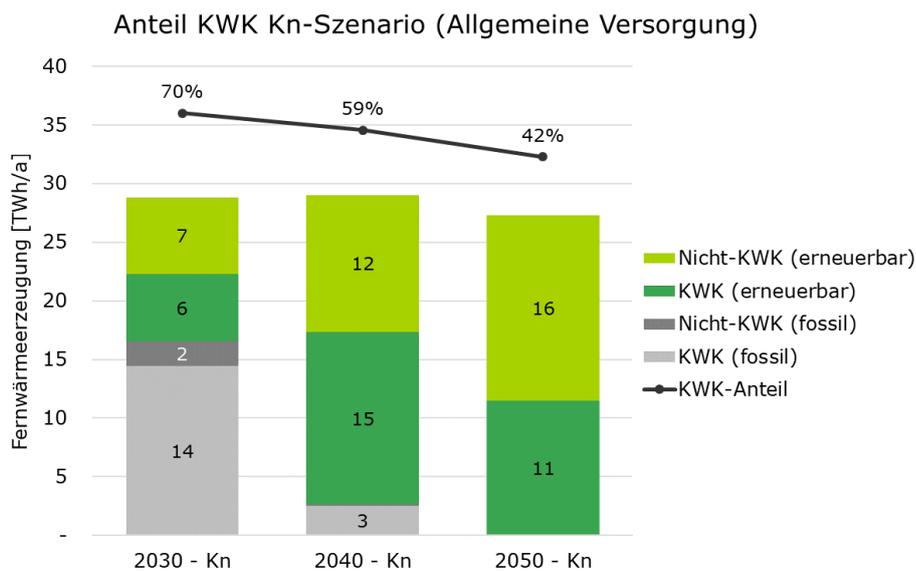


Abbildung 32: KWK-Anteile allgemeine Versorgung – Szenario

Die Zunahme von Wasserstoff-KWK von 2030 bis 2040 führt zu hohen Anteilen regenerativer KWK im Jahr 2040. Dennoch sinkt der KWK-Anteil durch den zunehmenden Anteil der regenerativen Wärmeerzeugung ohne KWK, insbesondere aus Wärmepumpen und industrieller Abwärme, von 70 % im Jahr 2030 auf 42 % im Jahr 2050.

Bei der allgemeinen Versorgung verzeichnet das Klimaneutral-Szenario sowohl die höchsten absoluten Werte der KWK-Stromerzeugung als auch den höchsten Strombedarf für PtX-Anwendungen (Abbildung 33). Dies liegt an dem hohen Niveau des Fernwärmebedarfs und dem u. a. daraus resultierenden hohen Niveau von Wasserstoff und Wärmepumpen im Energieträger- bzw. Technologiemix. Durch die Reduktion der Stromerzeugung sinkt auch die installierte elektrische Leistung von 7,8 GW im Jahr 2030 auf 4,1 GW im Jahr 2050.

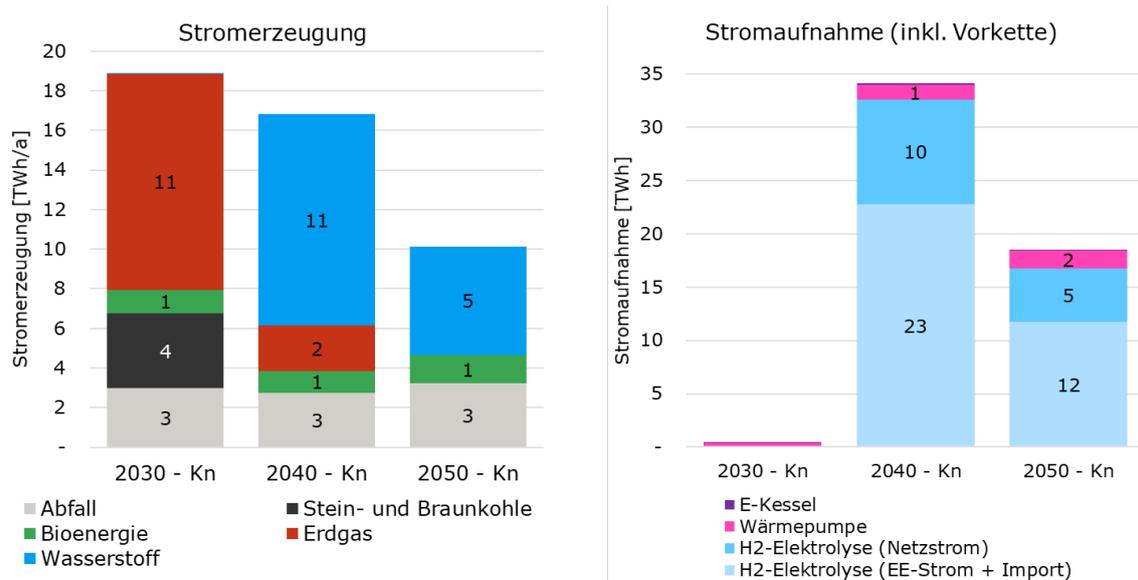


Abbildung 33: Stromezeugung (KWK) und -aufnahme in der allgemeinen Versorgung – Kn-Szenario

Die Stromerzeugung aus Wasserstoff-KWK ersetzt die Stromerzeugung der Kohle- und Erdgas-KWK im Jahr 2040 zu einem großen Teil, bis 2050 sinkt die Stromerzeugung jedoch stark. Im Jahr 2030 werden rund 19 TWh/a KWK-Strom erzeugt, 2050 lediglich 10 TWh/a. Der hohe Wasserstoff-Einsatz im Jahr 2040 resultiert in einer hohen Stromaufnahme der dafür erforderlichen Elektrolyse. Bis 2050 halbiert sich diese Stromaufnahme auf ca. 17 TWh/a, wohingegen der Strombedarf der Wärmepumpen von 1 TWh/a auf 2 TWh/a und somit in einem deutlich geringeren Umfang steigt.

Energieintensive Industrie

In der energieintensiven Industrie ist im Klimaneutral-Szenario der absolute Wärmebedarf im Jahr 2030 entsprechend der Szenario-Randbedingungen mit 40 TWh/a rund 10 % niedriger als im 80 %-Szenario und wird weiter reduziert auf rund 34 TWh/a im Jahr 2050 (Abbildung 34).

Für den Wärmebedarf mit Temperaturanforderung unter 150 °C ist im Jahr 2040 die Wärmepumpe die kosteneffizienteste Erzeugungstechnologie und verdrängt einen Großteil der Erdgas-KWK. Im Verhältnis zur allgemeinen Versorgung ist die Reduktion des CO₂-Budgets weniger ambitioniert, sodass die höheren CO₂-Emissionen der Wärmepumpe gegenüber Wasserstoff die Zielmarke der maximal verträglichen Treibhausgasemissionen nicht überschreiten. Wasserstoff stellt hingegen die einzige in größerem Maßstab relevante klimafreundliche Technologie zur Hochtemperatur-Wärmeerzeugung dar und wird anstatt Erdgas im Stützjahr 2040 eingesetzt, sodass dessen Anteil auf 36 % an der Gesamtwärmeerzeugung absinkt. Dieser Trend setzt sich bis 2050 fort, sodass der Anteil der Wärmepumpe auf 46 % an der Gesamtwärmeerzeugung ansteigt und Wasserstoff das verbliebene Erdgas der Hochtemperaturwärme ersetzt. Biomasse wird im Klimaneutral-Szenario in der Industrie im Jahr 2050 einen Anteil von ca. 10 % haben. Die Nutzung von Abwärme, Abfall und Solarthermie zur Wärmeversorgung ist im Vergleich zur allgemeinen Versorgung geringer, da es sich nur um Anteile in der Lieferung über Fernwärme handelt.

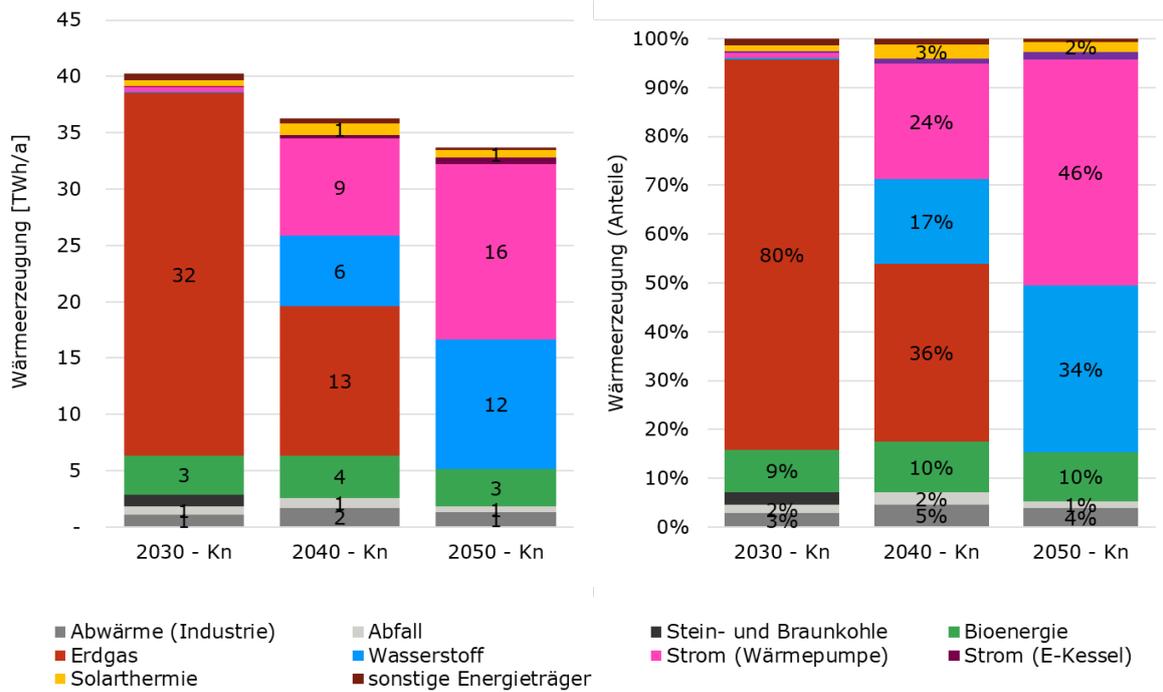


Abbildung 34: Absolute und relative Energieträgeranteile in der energieintensiven Industrie – Kn-Szenario

Die KWK-Anteile in der Industrie liegen im Klimaneutral-Szenario im Jahr 2030 auf ähnlichem Niveau wie im 80 %-Szenario, insbesondere fällt aber der stark sinkende Trend bis 2050 auf (Abbildung 35).

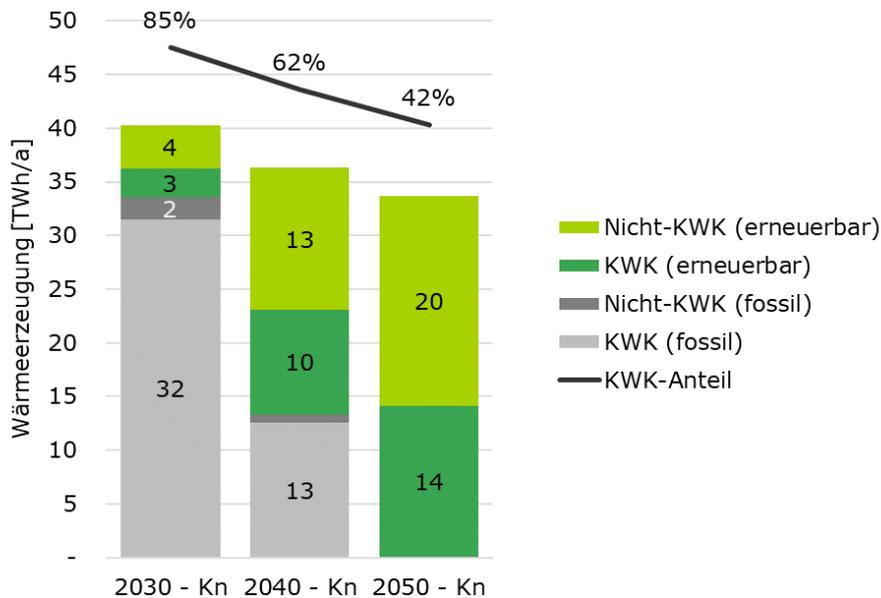


Abbildung 35: KWK-Anteile energieintensive Industrie – Kn-Szenario

Die KWK-Erzeugung erreicht mit 42 % im Jahr 2050 des Klimaneutral-Szenarios den niedrigsten Wert der beiden Szenarien und wird ausschließlich durch regenerative KWK-Technologien dargestellt. Mit rund 60 % wird der überwiegende Teil hingegen durch regenerative Nicht-KWK-Technologien bereitgestellt, insbesondere über die Wärmepumpe.

Die KWK-Stromerzeugung liegt im Klimaneutral-Szenario, insbesondere ab 2040, deutlich unterhalb des Werts des 80 %-Szenarios, was zum einen an dem geringeren zu deckenden Fernwärmebedarf, zum anderen an dem höheren Anteil von Wärmepumpen im Technologiemix liegt (Abbildung 36).

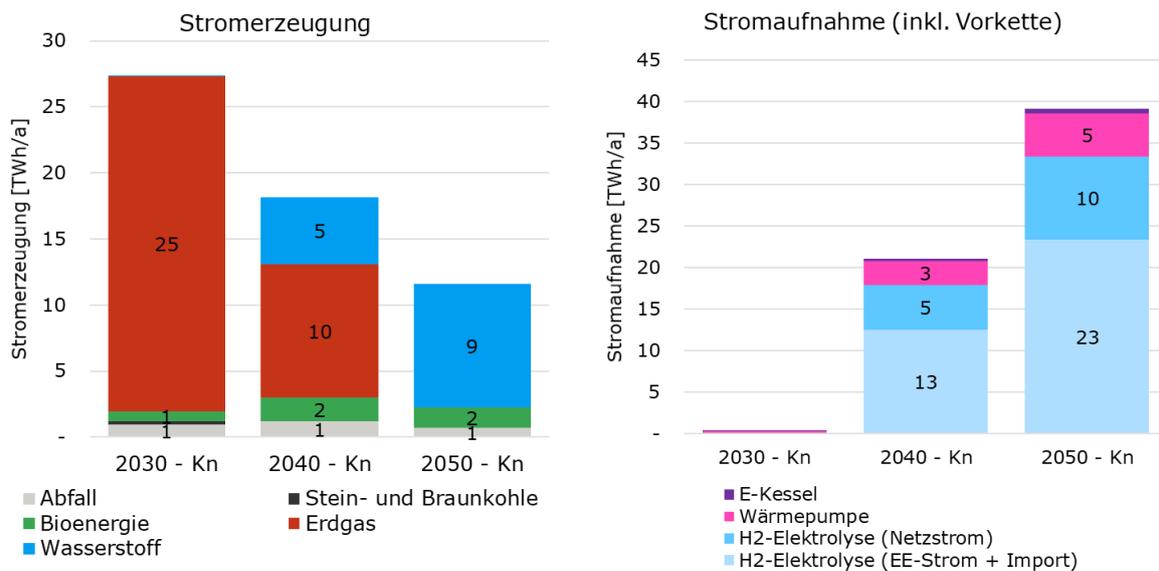


Abbildung 36: Stromezeugung (KWK) und -aufnahme in der energieintensiven Industrie – Kn-Szenario

Die Stromerzeugung sinkt demnach stark von gut 27 TWh/a im Stützjahr 2030 auf 12 TWh/a 2050. Auch die installierte elektrische Leistung sinkt um mehr als die Hälfte von 6 GW auf 2,6 GW. Die Stromaufnahme steigt ab 2040 mit höheren Anteilen an Wasserstoff und Wärmepumpen an der Wärmeerzeugung, ist jedoch mit insgesamt gut 39 TWh/a im Jahr 2050 für die Wasserstoff-Elektrolyse und die Wärmepumpe im Vergleich zum 80 %-Szenario deutlich geringer. Das ist u. a. darin begründet, dass im Klimaneutral-Szenario zum einen der zu deckende Wärmebedarf geringer ist und zum anderen die Wärmepumpe einen etwas größeren Anteil hat.

5.3.3 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Zielsysteme beruhen auf verschiedenen Annahmen und Rahmenbedingungen. Dabei haben einerseits ökologische (z. B. Festsetzung des CO₂-Budgets im Wärmemarkt) andererseits ökonomische Kriterien (z. B. Merit-Order) Eingang in die Entwicklung der Zielsysteme gefunden. Während die erneuerbaren und klimafreundlichen Energieträger auf Basis vorhandener Potenzialstudien und regionaler Restriktionen als feste Werte Eingang in die Zielsysteme gefunden haben, wurden die Anteile der sonstigen Energieträger über die Zielsysteme entwickelt. Dabei zeigt sich, dass neben den erneuerbaren

und klimafreundlichen Energieträgern die Wärmepumpe und der Wasserstoff maßgeblich zur CO₂-Reduktion bei der leitungsgebundenen Wärmeversorgung beitragen können.

Die Entwicklung der Mengen von Wasserstoff im Wärmemarkt mit Fokus auf die allgemeine Versorgung wird künftig durch die zur Verfügung stehenden Erzeugungs- sowie die geforderten Nachfragemengen in allen Sektoren beeinflusst. Aktuell weist der Wärmemarkt ein geringes Erlöspotenzial für sämtliche fossile und erneuerbare Energieträger gegenüber dem Verkehrssektor und der Industrie auf. Aus diesem Grund ist der Einsatz von Wasserstoff im Wärmemarkt nur in dem Umfang wahrscheinlich, der für das Erreichen der vorgegebenen Klimaschutzziele notwendig ist. Im Wärmemarkt sind zudem regenerative Alternativen zum Wasserstoff durch die Nutzung industrieller Abwärme sowie den Einsatz von Wärmepumpen mit erneuerbarem Strom vorhanden.

Für die Erzeugung von Wasserstoff wurde davon ausgegangen, dass zukünftig 70 % des Bedarfs direkt an den Standorten der erneuerbaren Stromerzeugung (z. B. an den Küsten mittels Off-Shore Wind) bzw. aus grüner Wasserstoffherzeugung aus dem Ausland importiert werden muss, da ein Großteil des in Deutschland über das öffentliche Versorgungsnetz zur Verfügung stehenden Stromes effizienter direkt genutzt werden kann. Dieser Anteil wurde als klimaneutral angenommen. Die übrigen 30 % des Wasserstoffbedarfs wurden durch Elektrolyse des Stroms aus dem öffentlichen Versorgungsnetz bei Angebotsüberschüssen hergestellt und daher mit den Emissionsfaktoren des deutschen Strommixes bewertet. Für die Antriebsenergie der Wärmepumpe wurde ein vollständiger Netzbezug aus dem öffentlichen Stromnetz angenommen, d. h. ausschließlich unter Berücksichtigung der Emissionsfaktoren des deutschen Strommixes. Mit einem angenommenen durchschnittlichen Jahres-Nutzungsgrad für Wärmepumpen von 3, ergeben sich teils höhere spezifische CO₂-Emissionsfaktoren als beim Wasserstoff.

Absolut gesehen sind die spezifischen Emissionen des deutschen Strommixes im 80 %-Szenario hoch, sodass die Wärmepumpe nur im begrenzten Umfang zum Einhalten des CO₂-Budgets der Fernwärme einsetzbar ist und Wasserstoff die einzige großskalige Alternative darstellt. In der Dekade 2050 und im Klimaneutral-Szenario im Jahr 2040 weist die Wärmepumpe relativ zu Wasserstoff weiterhin doppelt so hohe spezifische Emissionen auf, jedoch sind die absoluten Emissionen durch einen hohen Anteil Erneuerbarer Energien um 60 % bis 70 % gegenüber 2040 (80 %-Szenario) reduziert. Folglich sind die Auswirkungen der Emissionen der Wärmepumpe weniger hoch gewichtet und werden durch geringere Investitionskosten der Wärmepumpe im Vergleich zu Wasserstoff-KWK überwiegend aufgewogen.

Darüber hinaus führt ein zunehmender Ausbau Erneuerbarer Energien zum Rückgang der Einsatzzeiten der KWK-Anlagen, was den Kostennachteil von Wasserstoff-KWK mit hohen Investitionskosten im Vergleich zur Wärmepumpe verstärkt. Folglich steigt in der allgemeinen Versorgung die Wettbewerbsfähigkeit der Wärmepumpe im 80 %- und im Klimaneutral-Szenario im Jahr 2050 und die Wärmeerzeugung durch Wasserstoff ist in beiden Szenarien 2050 entsprechend rückläufig.

Im Gegensatz zur allgemeinen Versorgung ist die zunehmende Wettbewerbsfähigkeit der Wärmepumpe zum Ersatz von Erdgas-KWK in der Industrie lediglich zur Bereitstellung von Temperaturen < 150 °C geeignet. Für Hochtemperatur-Prozesse hingegen stellt der Wasserstoff – abgesehen von der direkten Elektrifizierung – die einzige, großskalige,

emissionsreduzierende Wärmeerzeugungstechnologie dar, sodass in der Industrie nicht von einem rückläufigen Einsatz von Wasserstoff in der Dekade 2050 in beiden Szenarien auszugehen ist.

Allgemein sind weitere Verschiebungen hin zu höheren Anteilen von Wasserstoff im Wärmemarkt zukünftig grundsätzlich möglich, es erscheint jedoch unter den in dieser Studie angenommenen Randbedingungen nicht wirtschaftlich tragfähig. So könnten ein beschleunigter Ausbau der Erneuerbaren Energien weltweit oder die Zunahme von Netzengpässen im deutschen Stromnetz, zu einer höheren Wasserstoffproduktion und sinkenden Wasserstoffgestehungskosten führen. Synergieeffekte durch den Aufbau einer Transportinfrastruktur, z. B. für die Versorgung der Industrie mit Wasserstoff über Pipelines, können ebenfalls kostensenkend wirken und den Einsatz von Wasserstoff im Wärmemarkt begünstigen.

6 Räumliches Potenzial der leitungsgebundenen Wärmeversorgung in NRW

Im Folgenden wird das im vorherigen Kapitel dargelegte Potenzial über die Zielsysteme regional verortet. Die räumliche Verortung erfolgte nur für die allgemeine Versorgung inkl. der flächendeckend verteilten Prozesswärme (PW-Gruppe 3+4), also dem Anteil der Prozesswärme, der nicht der energieintensiven Industrie zuzuordnen wurde (vgl. Abbildung 24). Zwar handelt es sich bei Industrieunternehmen häufig um Ankerkunden der Fernwärme, aus methodischen Gründen wurden diese jedoch aus der räumlichen Verortung herausgelöst. Zum einen weist die energieintensive Industrie so hohe Wärmebedarfe auf, dass die Bedarfskarten stark verzerrt werden würden. Gleichzeitig sind diese Unternehmen so individuell, dass eine Abbildung der Entscheidungen über statistische Annahmen nicht möglich ist. Für die Fernwärme im Bereich der Wohn- und Nichtwohngebäude ist dies aufgrund der hohen Anzahl an Gebäuden und Akteuren sehr gut möglich.

6.1 Methodik

Die räumliche Verortung des leitungsgebundenen KWK-Potenzials basiert auf den Ergebnissen der für NRW gebildeten Zielsysteme der allgemeinen Versorgung und erfolgte in vier Schritten:

1. Flächendeckende Clusterung (Gebietseinteilung) von NRW
2. Festlegung des Netzaus- und -neubaus auf Grundlage der Cluster
3. Zuordnung der Erzeugungstechniken zu den Wärmenetzen
4. Ermittlung der strukturell und räumlich differenzierten KWK-Potenziale

Diese Schritte werden nachfolgend näher beschrieben. Bei dem vierten Schritt handelt es sich um die Auswertung der Ergebnisse, die in Kapitel 6.2 beschrieben wird.

6.1.1 Flächendeckende Clusterung

Auf Grundlage des Wärmebedarfsmodells in gebäudescharfer Auflösung, der bestehenden Wärmenetze mit bekannter räumlicher Auflösung und definierten Infrastrukturgrenzen, welche zumeist Grenzen für den Netzausbau darstellen (Autobahnen, Flüsse, Eisenbahnstrecken; abgeleitet aus [GEOBASIS NRW, 2020]), wurde NRW flächendeckend in Cluster eingeteilt. Die Cluster wurden auf Grundlage von Baublöcken gebildet [vgl. LANUV & INWIS, 2020] und ergänzt, da nicht alle als beheizt eingestuft Gebäude innerhalb von Baublöcken lagen. Gemeindegrenzen oder die Grenzen von Versorgungsgebieten fanden keine Berücksichtigung bei der Bildung der Cluster.

Im ersten Schritt wurden Gebiete mit einer zu geringen Wärmedichte ausgefiltert. Dazu wurde eine Rasterkarte erstellt, aus der die Wärmedichte hervorgeht. Zur Erstellung der Wärmedichtekarte wurde ein Raster mit der Zellgröße von 80 x 80 m über NRW gelegt. Alle beheizten Gebäude wurden mit ihrem Wärmebedarf der Rasterzelle zugeordnet, in der ihr jeweiliger Mittelpunkt liegt. Der Wärmebedarf aller Gebäude innerhalb einer Rasterzelle wurde

zunächst aufsummiert. In der Folge wurde der Wärmebedarf im Radius von 160 m auf angrenzende Rasterzellen verteilt, wobei der Anteil immer kleiner wird, je weiter eine Zelle entfernt ist. Durch dieses Verfahren wurden Gebiete mit hoher Wärmedichte sichtbar, da eine Lösung vom Einzelgebäude hin zur Betrachtung des Siedlungsumfeldes erfolgte, in dem sich ein Gebäude befindet. So war eine Trennung von einzeln stehenden Gebäuden zu geschlossenen Siedlungsbereichen möglich (vgl. Abbildung 37).

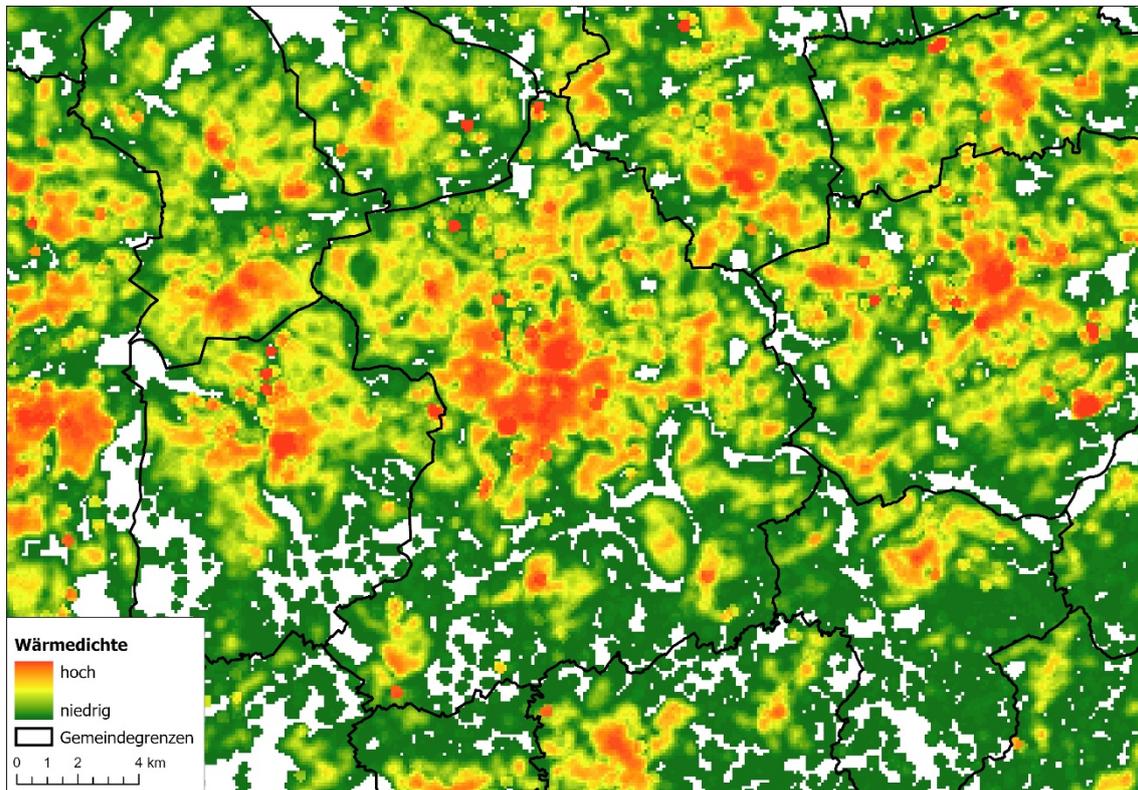


Abbildung 37: Ausschnitt Wärmedichtekarte

Alle Gebiete, deren Wärmebedarf unterhalb des Grenzwertes von $7,5 \text{ kWh/m}^2 \text{ a}$ lagen, wurden aus den folgenden Arbeitsschritten ausgeschlossen. Der Grenzwert wurde bewusst niedrig gewählt um möglichst wenig Gebiete auszuschließen. Bei einer noch geringeren Wärmedichte muss davon ausgegangen werden, dass eine Versorgung durch ein Wärmenetz zwar nicht gänzlich ausgeschlossen, aber doch sehr unwahrscheinlich ist. Abbildung 38 verdeutlicht, dass lediglich einzeln stehende Gebäude aussortiert wurden, zusammenhängende Siedlungsgebiete blieben bestehen.

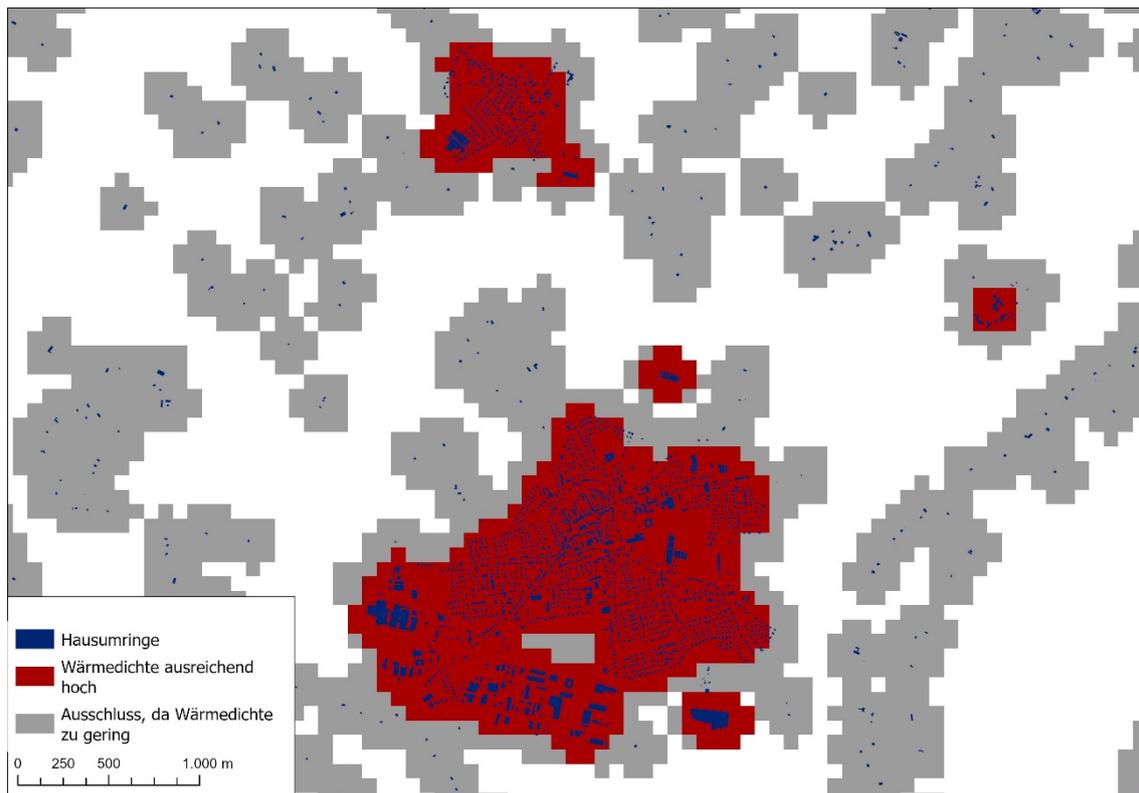


Abbildung 38: Ausschluss von Gebieten mit zu geringer Wärmedichte

Der zweite Schritt war anschließend die Bildung von Clustern um bestehende Wärmenetze. Dazu wurde ein Puffer (Umrandung mit dem Abstand von 25 m) um alle Wärmenetze mit bekanntem Netzverlauf gelegt und alle Baublöcke ausgewählt, die diesen Puffer berühren. Lag statt des konkreten Netzverlaufs nur die Information zum Heizungstyp aus dem Zensus vor (s. Kapitel 2.3), wurden alle Baublöcke ausgewählt, die die entsprechenden Rasterzellen aus der Zensus-Erhebung berührten.

Im Anschluss an die Auswahl der Baublöcke wurde geprüft, dass keine Baublöcke ausgewählt wurden, die durch Infrastrukturgrenzen von dem Wärmenetz getrennt sind. Abbildung 39 verdeutlicht diesen Arbeitsschritt. Die grün eingefärbten Baublöcke berühren den rot dargestellten Puffer um ein bekanntes Wärmenetz und bilden damit ein Bestandsnetzcluster.

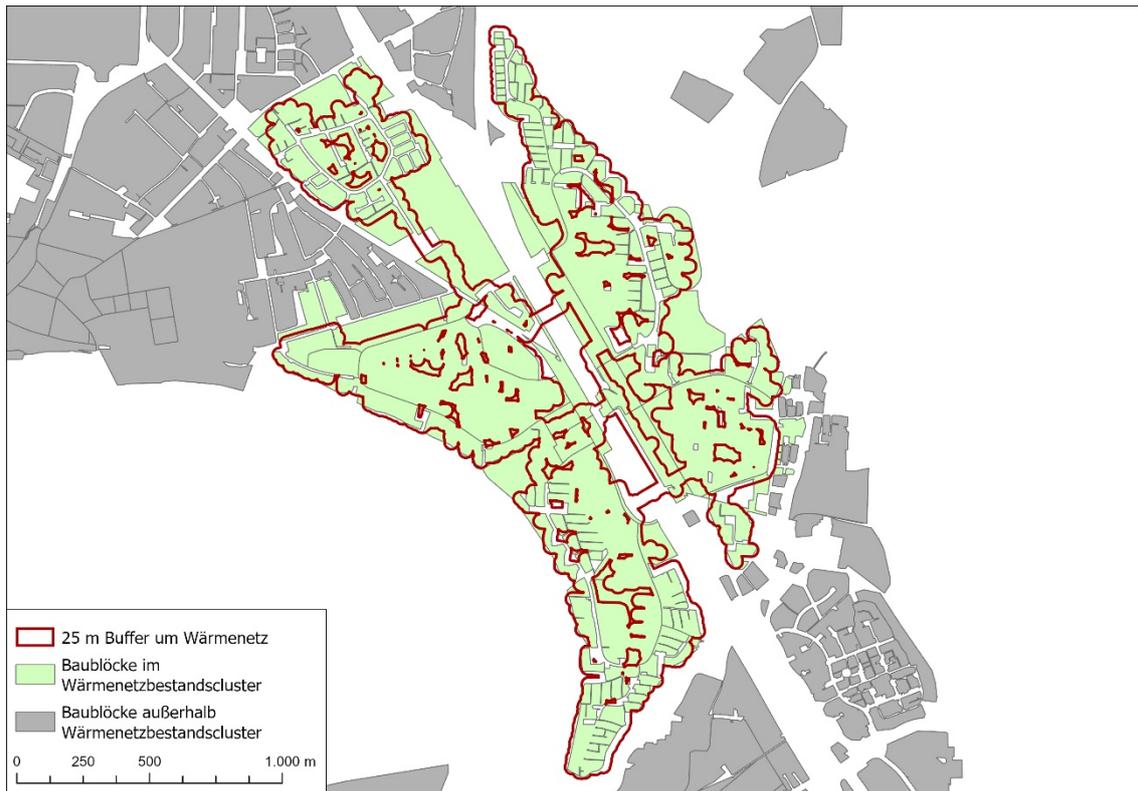


Abbildung 39: Bildung von Clustern um die bestehende Wärmenetze

Um die Bestandsnetzcluster der Netztypen 1 bis 4 (vgl. Tabelle 6) herum wurden im nächsten Schritt Erweiterungscluster definiert. Für die Netztypen 1 & 2 galt dabei ein Puffer von 2.000 m bzw. 1.000 m und für die Netztypen 3 & 4 ein Puffer von 400 m. Die dargestellten Entfernungen orientieren sich an Erfahrungswerten, die aus vergangenen Projekten des Fraunhofer IFAM abgeleitet wurden. Die Unterschiede ergeben sich durch die Netzgröße, d. h. je größer ein Netz ist, umso eher ist eine Erweiterung möglich. Für die anderen Netztypen wurden keine Erweiterungsgebiete vorgesehen, da die Wärmenetze zumeist so klein sind, dass eine Erweiterung zwar nicht ausgeschlossen, aber unwahrscheinlich ist.

Analog zu den Bestandsnetzclustern wurde ein Baublock einem Erweiterungscluster zugeordnet, wenn er den Puffer wie oben beschrieben berührt. Liegt ein Baublock an mehreren Erweiterungspuffern an, wurde er demjenigen Erweiterungscluster zugeordnet, dessen Netz näher lag. Im Anschluss wurden auch die Erweiterungscluster an den Infrastrukturgrenzen abgeschnitten. Eine Ausnahme bildeten Gemeinden im Ruhrgebiet. Hier liegen die Netze so dicht beieinander, dass eine Zuordnung der Baublöcke zu den Erweiterungsgebieten teilweise zufällig ist. Es fand auch keine Nachbearbeitung an Infrastrukturgrenzen statt, da diese in sehr vielen Fällen durch die Netze gequert werden. Abbildung 40 zeigt beispielhaft die Bildung eines Erweiterungsclusters. Die Baublöcke, die das Erweiterungscluster bilden, sind blau eingefärbt.

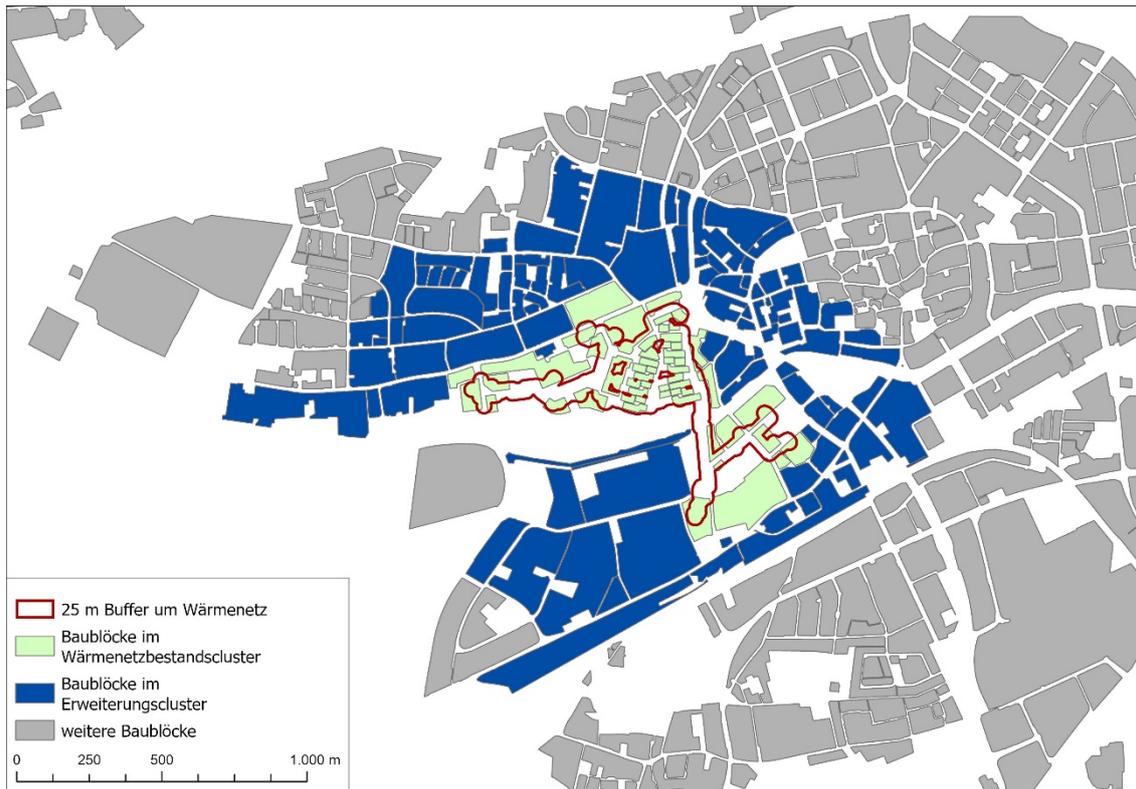


Abbildung 40: Bildung von Clustern in Erweiterungsgebieten um bestehende Wärmenetze

Der letzte Schritt der Clusterbildung war schließlich die Bildung von Clustern für Baublöcke bzw. Gemeinden, die nicht durch bestehende Wärmenetze beeinflusst werden. Zunächst wurden alle auf Grundlage der Rasterkarte zusammenhängenden Baublöcke zusammengefasst. Diese wurden dann an den relevanten Infrastrukturgrenzen geteilt. Schließlich wurde ermittelt, ob ein Cluster einen dominierenden Einfluss innerhalb einer Gemeinde hat. War dies der Fall, wurde es anhand von weiteren Infrastrukturen (beispielsweise Bundesstraßen) bzw. der Siedlungsstruktur (z. B. Innenstadt oder Gewerbegebiete) weiter geteilt. So wurde sichergestellt, dass das Gemeindeergebnis bezogen auf die Potenziale nicht durch ein einzelnes Cluster geprägt wird. Abbildung 41 zeigt beispielhaft die Einteilung einer Gemeinde in Cluster.

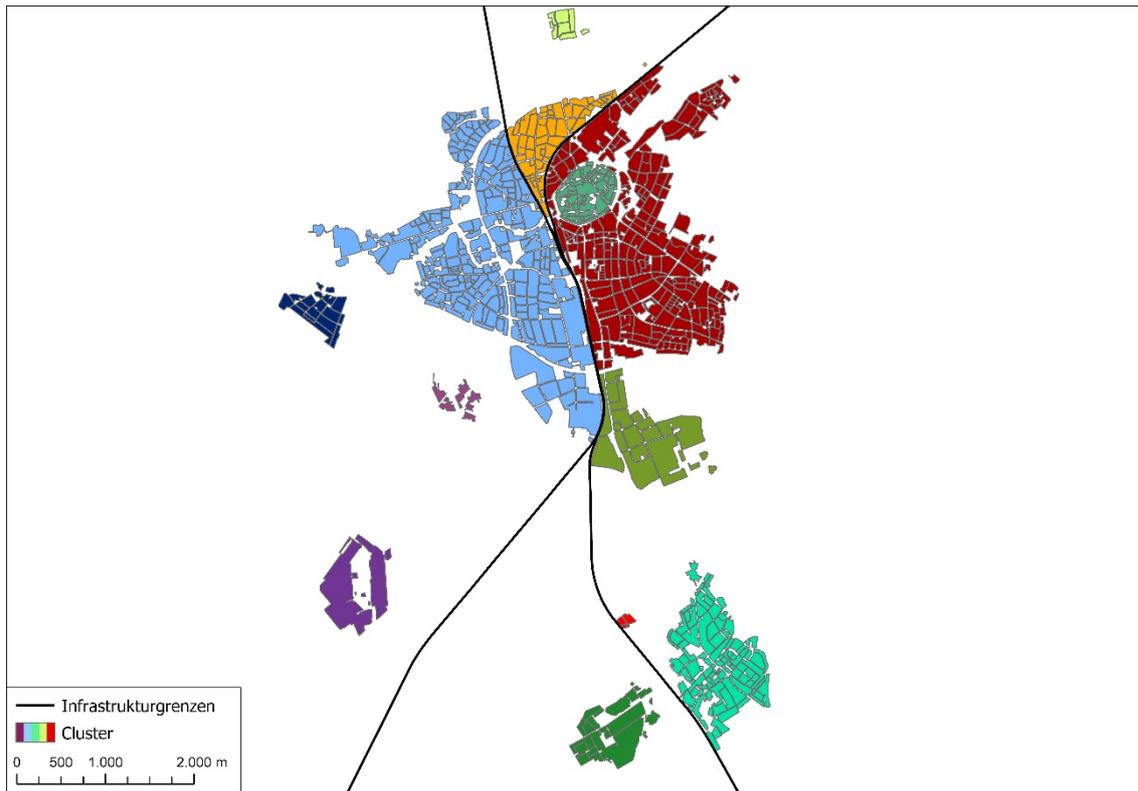


Abbildung 41: Bildung von Clustern ohne Bezug zu Bestandsnetzen

Da die Cluster zur Modellierung einer leitungsgebundenen Wärmeversorgung genutzt wurden, müssen sich mindestens 20 potenzielle Hausanschlüsse (Gebäude mit Hauskoordinaten) in einem Cluster befinden. Bei Clustern mit weniger Hausanschlüssen sind die getroffenen statistischen Annahmen nicht mehr zulässig, da einzelne Gebäude die Cluster zu sehr dominieren würden.

Insgesamt wurden auf diese Weise 6.725 Cluster gebildet. In beiden Szenarien liegen ca. 92 % des Wärmebedarfs innerhalb der Cluster, die restlichen 8 % liegen in Bereichen, die im ersten Schritt aufgrund der zu geringen Wärmedichte oder später aufgrund der zu geringen Anzahl an Hausanschlüssen ausgeschlossen wurden.

Alle Cluster wurden anschließend mit Blick auf die nächsten Arbeitsschritte klassifiziert. Zudem wurden für jedes Cluster zahlreiche Kennwerten erhoben. Im Folgenden sind diejenigen mit wesentlicher Bedeutung für die Studie dargestellt:

- Anzahl Gebäude bzw. Hauskoordinaten
- Wärmebedarf Ist-Stand und Fortschreibung
- Klassifizierung in einen von sieben Siedlungstypen (kleine Wohngebäude, große Wohngebäude, Gewerbe/Handel/Dienstleistung, Gewerbegebiete, Öffentliche Gebäude, City, ländlich)
- Verteilnetzlänge zur Erschließung mit Wärmenetzen (abgeleitet aus dem Straßennetz das innerhalb der Cluster liegt)
- Wärmelinien-dichte Ist-Stand und Fortschreibung
- Kältegruppe (Regionalisierung bzgl. Klimawandel)
- Netztyp (nur bei Bestands- und Erweiterungsclustern)

Die Cluster wurden anschließend in eine der folgenden Kategorien eingeordnet:

Bestandscluster: Cluster in denen bereits ein Fernwärmenetz liegt

Erweiterungscluster: Cluster, die unmittelbar an Bestandscluster mit dem Netztypen 1 bis 4 anschließen

Gewerbe: Cluster ohne Fernwärmebestandsnetz, die durch Gewerbe dominiert werden

Öffentlich: Cluster ohne Fernwärmebestandsnetz, die durch öffentliche Gebäude geprägt sind

Ländlich: Cluster ohne Fernwärmebestandsnetz im ländlichen Raum

Sonstige: Cluster ohne Fernwärmebestandsnetz, das durch keines der genannten Kriterien dominiert wird

6.1.2 Netzausbau und -neubau

Um die KWK-Potenziale für eine leitungsgebundene Versorgung ermitteln zu können, war zunächst die Modellierung des Aus- bzw. Neubaus der Wärmenetze notwendig. Der Wärmebedarf, der durch Wärmenetze zu den einzelnen Zeitpunkten in den Szenarien gedeckt werden soll war dabei vorgegeben (vgl. Kapitel 4). Die Modellierung lief grundsätzlich nach den folgenden Prinzipien ab:

- alle Bestandsnetze blieben in der Modellierung erhalten
- zunächst wurde das Jahr 2050 betrachtet (maximaler Ausbau), danach folgte 2040 und schließlich 2030
- Wärmenetze, die im Jahr 2050 als neue Netze definiert wurden, sind auch in 2030 bereits als Wärmenetz in der Modellierung vorhanden, allerdings mit einem geringeren Anschlussgrad

Die Modellierung begann mit dem Jahr 2050, da der maximale Ausbaustand erreicht werden musste. Durch die Modellierung beginnend im letzten Jahr wurde sichergestellt, dass auch die hohen Fernwärmeanteile im Klimaneutral-Szenario im Jahr 2050 durch einen konsistenten Ausbaupfad erreicht werden.

Zunächst wurde die Wärmemenge in den Bestandsnetzclustern bei einem steigenden Anschlussgrad ermittelt. Für den Ist-Stand wurde ein mittlerer Anschlussgrad von 35 % festgelegt und auf die Gebiete übertragen, für die ein georeferenziertes Wärmenetz zur Verfügung stand. Der Anschlussgrad steigt in der Modellierung in den Bestandsclustern bis 2050 im 80 %-Szenario auf 50 % und im Klimaneutral-Szenario auf 60 %. Die Anschlussgrade wurden aus vorherigen Projekterfahrungen und Gesprächen mit verschiedenen Energieversorgern abgeleitet. In einzelnen Netzen werden diese Anschlussgrade bereits heute erreicht und sind damit als Ziel für die Zukunft als realistisch anzusehen. Eine Übersicht über alle angenommenen Anschlussgrade kann Tabelle 30 entnommen werden. Die Differenz zwischen der Wärmemenge aus heutigen Bestandsnetzen zuzüglich der Wärmemenge aus der Verdichtung dieser Netze und der gesamten Wärmemenge der leitungsgebundenen Versorgung entsprach der Wärmemenge, die durch Netzerweiterung und Netzneubau gedeckt werden musste.

Die künftig durch die Fernwärme zu deckende Wärmemenge setzte sich aus dem Ausbau der Bestandsnetze in den Erweiterungsclustern sowie dem Aufbau von Wärmenetzen in Clustern ohne bereits bestehende Netze zusammen. Die Grundannahme war, dass die Wahrscheinlichkeit eines Wärmenetzaus- bzw. -neubaus umso größer ist, je höher die mittlere Wärmelinien-dichte in einem Cluster ist, da diese ein zentraler Indikator für die Wirtschaftlichkeit eines Wärmenetzes darstellt. Es gab jedoch einige Cluster, in denen ein Wärmenetz zwingend erforderlich ist, da die Nutzung der erneuerbaren Energiequellen Warmes Grubenwasser, Klärgas und Abfall bereits durch die räumliche Verortung der Standorte über die schon erstellten Potenzialstudien vorgegeben war. Die Standorte der Erzeugungsanlagen sind in allen Szenarien identisch, die Zuordnung zu den Clustern ebenfalls, da sie durch die konkrete Lage vorgegeben sind. Die Standorte wurden dem jeweils nächstgelegenen Cluster zugeordnet, in Abhängigkeit vom Szenario sowie der Wärmequelle wurde ein maximaler Erzeugungsanteil an der Wärmemenge je Netz in diesem Cluster zugelassen. Wurde dieses Maximum erreicht, wurden weitere Cluster in direkter Nachbarschaft hinzugezogen, um das Potenzial aufzunehmen.

Wie bereits beschrieben, wurde bei den verbleibenden Clustern davon ausgegangen, dass die Wahrscheinlichkeit eines Wärmenetzausbaus mit der Wärmelinien-dichte steigt. In Abhängigkeit des Szenarios wurde eine bewusst eher niedrig angesetzte Mindestwärmelinien-dichte von 1.000 kWh/m a im 80 %-Szenario und 750 kWh/m a im Klimaneutral-Szenario festgelegt. Unterhalb dieser Werte wurde kein Wärmenetzneubau modelliert. Zudem wurde eine obere Grenze festgelegt, ab der die Wärmenetze in der Modellierung sicher ausgebaut wurden (80 %: 5.100 kWh/m a, Klimaneutral: 4.000 kWh/m a), weil hier die besten strukturellen Gegebenheiten vorhanden sind. Die Werte für die unteren Grenzen ergaben sich aus den Diskussionen mit der projektbegleitenden Arbeitsgruppe und vorherigen Projekterfahrungen, die oberen Grenzwerte wiederum aus den insgesamt zu verteilenden Fernwärmemengen. In den Bereichen dazwischen stieg die Wahrscheinlichkeit linear mit der Wärmelinien-dichte. Es gab jedoch einige Faktoren, die die Wahrscheinlichkeit entweder zusätzlich erhöhten oder verminderten:

- Öffentlich: Es wurde davon ausgegangen, dass Cluster, in denen öffentliche Gebäude dominieren, eine höhere Wahrscheinlichkeit für den Aufbau eines Wärmenetzes aufweisen, da die öffentliche Hand mit gutem Beispiel vorangeht und der Anschluss mehrerer Objekte gesammelt über einen Ansprechpartner abgewickelt werden kann. Dies mindert den Transaktionsaufwand für einen Netzbetreiber und erhöht die Planbarkeit der Wärmeabnahme
- Ländlich: Die Erfahrung zeigt, dass im ländlichen Raum einige Wärmenetzprojekte realisiert werden, obwohl die Wärmelinien-dichte nicht sehr hoch ist (z. B. Bioenergiedorf). Hier spielen häufig andere Faktoren als die reine Wirtschaftlichkeitsrechnung eine Rolle, z. B. der Antrieb einzelner Akteure vor Ort und gute Chancen für die Nutzung von Biomasse oder Solarthermie. Aus diesem Grund wurde die Wahrscheinlichkeit für ländliche Cluster ebenfalls erhöht
- Gewerbe: Zwar weisen Gewerbegebiete häufig eine überdurchschnittlich hohe Wärmelinien-dichte auf, allerdings entscheiden sich Gewerbebetriebe häufig für individuelle Versorgungslösungen. Daher wurde die Realisierungswahrscheinlichkeit gesenkt

- Gebiete mit hoher Hitzebelastung: Für Cluster, die in Bereichen mit besonders hoher Hitzebelastung liegen, wurde von einer erhöhten Realisierungswahrscheinlichkeit ausgegangen, da neben dem Absatz von Wärme perspektivisch auch Kältenetze bzw. die Erzeugung von Kälte aus Wärmenetzen interessant werden könnte

Tabelle 30 zeigt die zugrunde gelegten Anschlussgrade in Abhängigkeit von dem Szenario, dem betrachteten Jahr und der Clusterkategorie. Es wurde davon ausgegangen, dass bei der Errichtung eines Wärmenetzes in dieser Dekade ein Anschlussgrad in Höhe von rund 20 % erreicht wird, um eine Investitionsentscheidung rechtfertigen zu können. Die konkrete Höhe ergab sich aus den Fernwärmebedarfen in den Szenarien, ebenso wie die unterschiedlichen Entwicklungen in den einzelnen Dekaden.

Tabelle 30: Angenommene Anschlussgrade für Wärmenetze

80 %-Szenario	Ist	2030	2040	2050
Bestandscluster	35 %	41 %	46 %	50 %
Erweiterungscluster	-	18 %	22 %	40 %
Gewerbe	-	18 %	22 %	40 %
Öffentlich	-	27 %	34 %	60 %
Ländlich	-	27 %	34 %	60 %
Sonstige	-	18 %	22 %	40 %
Kn-Szenario	Ist	2030	2040	2050
Bestandscluster	35 %	46 %	53 %	60 %
Erweiterungscluster	-	23 %	33 %	50 %
Gewerbe	-	23 %	33 %	50 %
Öffentlich	-	33 %	46 %	70 %
Ländlich	-	33 %	46 %	70 %
Sonstige	-	23 %	33 %	50 %

6.1.3 Zuordnung der Erzeugungstechniken zu den Wärmenetzen

Die Erzeugungstechniken Warmes Grubenwasser, Abfall sowie Klärgas wurden bereits den Clustern aufgrund der räumlichen Lage zugeordnet. Ein weiterer Energieträger, der aufgrund der Lage konkreten Clustern zugewiesen wurde, ist die Kohle. Wie in Kapitel 4 beschrieben, folgte diese Studie dem Kohleausstiegspfad, sodass 2030 in der allgemeinen Versorgung noch drei Anlagen Kohle einsetzen, deren Standorte bekannt sind.

Die Verortung der verbleibenden Erzeugungstechniken (vgl. Tabelle 29) erfolgte nach der im Folgenden beschriebenen Methodik, wobei die Gesamtwärmemengen der einzelnen Erzeugungstechniken eine Vorgabe aus den Zielsystemen waren:

- aus den Erzeugungsmengen wurden je Erzeugungstechnik (soweit möglich) die konkrete Anzahl an Anlagen ermittelt und in die Cluster verteilt
- in Abhängigkeit der Erzeugungstechnik und dem Mix der so verteilten Techniken wurden Obergrenzen für die Anteile der weiteren Erzeugungstechniken angesetzt (z. B. aufgrund des Temperaturniveaus)
- Anlagen mit größerer Leistung konnten nur Netzen mit einem ausreichend großen Wärmebedarf zugeordnet werden
- zuerst wurde das Jahr 2050 modelliert (maximaler Ausbauzustand der Netze, größte Veränderung zum Ist-Stand), dann erfolgte die Modellierung der Stützjahre 2040 und 2030
- bei einigen Erzeugungstechniken gab es eine zeitliche Abhängigkeit. Beispielsweise kann Wasserstoff dann in den Jahren 2030 und 2040 zum Einsatz kommen, wenn dieser auch 2050 genutzt wird. Für Gas-BHKW galt diese Einschränkung aufgrund der vorhandenen Gas-Infrastruktur nicht
- die Verortung erfolgte in der hier dargestellten Reihenfolge, in der die Abhängigkeit von konkreten Standorten immer weiter abnimmt

Die Eignungskriterien zur Zuordnung der Technologien zu Clustern wird im Folgenden detailliert beschrieben. Bei gleicher Eignung mehrerer Cluster wurde durch eine Zufallszahl die Zuordnung bestimmt.

Eine räumliche Abhängigkeit war bei der Verfügbarkeit von Wasserstoff gegeben. Diese war jedoch weniger konkret als bei den bisher beschriebenen Techniken. Abbildung 42 zeigt die Gemeinden, in denen für das Jahr 2050 von der Verfügbarkeit von Wasserstoff für die zentrale Wärmeerzeugung ausgegangen wurde. Die Auswahl der Gemeinden orientierte sich an der Wasserstoff Roadmap NRW [MWIDE, 2020] und dem Netzentwicklungsplan Gas [FNB GAS, 2020], am Prozesswärmebedarf innerhalb der Gemeinden und an dem Anteil, der aus den Zielsystemen für den Einsatz von Wasserstoff vorgegeben wurde. Damit ergaben sich je nach Szenario unterschiedliche Gemeinden, für die die Verfügbarkeit von Wasserstoff angenommen wurde.

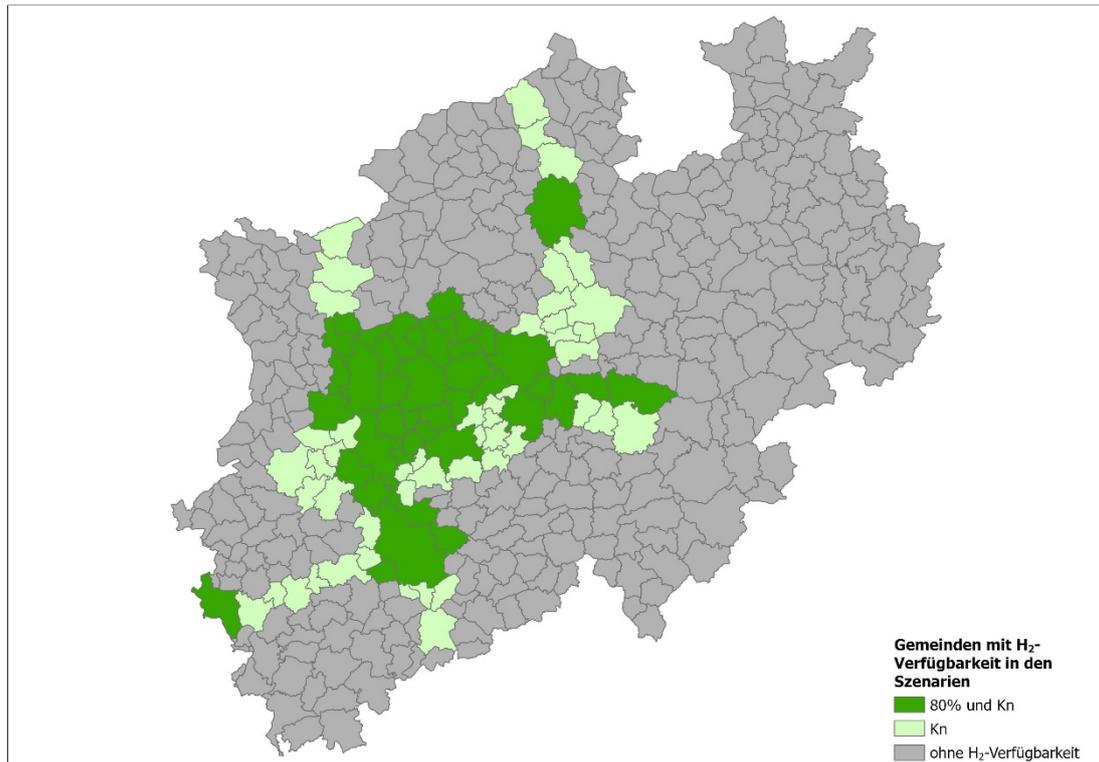


Abbildung 42: Gemeinden mit Verfügbarkeit von Wasserstoff in 2050

Wasserstoff-GuD wurden nur in Clustern eingesetzt, die einen ausreichenden Bedarf aufweisen, um die Wärmemengen auch aufzunehmen zu können, die durch diese Anlagen erzeugt werden. Daher waren die großen Bestandsnetze prädestiniert für Wasserstoff-GuD. Anders sah es bei den deutlich kleineren Wasserstoff-BHKW und den Brennstoffzellen aus. Diese konnten in jedem Netz zum Einsatz kommen, solange von einer Verfügbarkeit des Wasserstoffes in der Gemeinde ausgegangen wurde.

Auch bei der industriellen Abwärme gibt es eine räumliche Abhängigkeit von der Gemeinde, in der das Wärmenetz liegt. Es gab jedoch keine Möglichkeit, die industrielle Abwärme konkreten Unternehmen und Clustern zuzuordnen. Stattdessen wurde über Informationen aus der Verteilung des Prozesswärmeeaufkommens und der Potenzialstudie zur industriellen Abwärme [LANUV, 2019] ermittelt, in welchen Gemeinden das Potenzial für die Nutzung der industriellen Abwärme besonders hoch ist. Diesem Vorgehen lag die Annahme zugrunde, dass die Nutzung von industrieller Abwärme umso wahrscheinlicher ist, je mehr Prozesswärme vorhanden ist.

Die Zuweisung der Solarthermie zu den Wärmenetzen wurde in Abhängigkeit von der Clusterkategorie durchgeführt. Für die Bestandsnetze und Erweiterungscluster wurde außerdem der Netztyp berücksichtigt. In Tabelle 31 sind die getroffenen Annahmen für die Nutzung von Solarthermie und der maximale solare Deckungsgrad für das Jahr 2050 angegeben. In Abhängigkeit vom Szenario unterscheiden sich die Werte. Je ambitionierter das Szenario ist, umso größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass Solarthermie eingesetzt wird und umso höher ist der solare Deckungsgrad. In den früheren Jahren sind die Werte entsprechend geringer. Dabei ist der Flächenbedarf zur Erreichung der jeweiligen solaren Deckungsgrade in Wärmenetzen mit geringem Wärmebedarf kleiner, weshalb im ländlichen Raum durch sehr

viel bessere Flächenverfügbarkeiten die Wahrscheinlichkeit deutlich höher ist als im städtischen Umfeld.

Tabelle 31: Angenommene Werte für den Einsatz der Solarthermie in Wärmenetzen bis 2050

Cluster-kategorie	80 %-Szenario		Kn-Szenario	
	Max. solarer Deckungsgrad	Wahrscheinlichkeit	Max. solarer Deckungsgrad	Wahrscheinlichkeit
Gewerbe	10 %	35 %	10 %	40 %
Öffentlich	10 %	35 %	10 %	40 %
Ländlich	40 %	75 %	50 %	80 %
Sonstige	25 %	75 %	30 %	80 %
Netztyp				
Großstadt	12 %	35 %	16 %	40 %
Mittelstadt	25 %	35 %	30 %	40 %
Kleinstadt / Inselnetz Groß- oder Mittelstadt	40 %	75 %	50 %	80 %
Neueres Bestandsnetz	40 %	75 %	50 %	80 %
Ländlicher Raum	40 %	75 %	50 %	80 %
Insel	40 %	75 %	50 %	80 %
Industrie	-	-	-	-

Für die noch verbleibenden Erzeugungstechniken und Energieträger Biomasse, Großwärmepumpe und Erdgas galten keine räumlichen Abhängigkeiten und auch keine Abhängigkeiten von der Clusterkategorie oder dem Netztyp. Lediglich die Wärmemenge, die in den Netzen noch nicht durch die zugewiesenen Techniken gedeckt war, musste zur Größe der jeweiligen Anlagen passen. So kamen beispielsweise Erdgas-GuD und Gasturbinen mit Abhitzekeessel bevorzugt in großen Bestandsnetzen zum Einsatz, während Biomasse-BHKW in hohem Maße in ländlichen Netzen oder in Gewerbegebieten eingesetzt wurden.

6.2 Ergebnisse in den Szenarien

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte getrennt nach den einzelnen Erzeugungstechniken und Energieträgern in Abhängigkeit von den Clusterkategorien, Netztypen, Stadtgrößen und der räumlichen Verteilung in NRW. Die Ergebnisse werden für die beiden Szenarien 80 % und Klimaneutral und die jeweiligen Jahre dargestellt, also für insgesamt sechs Fälle sowie für den Ist-Stand (Wärmebedarf in einem Netzgebiet bei einem Anschlussgrad von 35 %) in beiden Szenarien. In diesem Kapitel werden die Tabellen zusammenfassend ausgewertet, um wesentliche strukturelle Ergebnisse darzustellen. Die Energieträgeranteile der Netztypen und Clusterkategorien können Anhang 1 & 2 entnommen werden. Die hier dargestellten Wärmemengen beziehen sich auf den zu deckenden gebäudeseitigen Wärmebedarf, Leitungsverluste wurden an dieser Stelle nicht berücksichtigt. Zur Vereinfachung wird im Folgenden der Begriff Fernwärme übergreifend für die allgemeine Wärmeversorgung genutzt, also sowohl für Nah- als auch Fernwärme.

6.2.1 80 %-Szenario

Im Folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse des 80 %-Szenarios vorgestellt. In diesem Szenario ist deutlich zu erkennen, dass die Menge an Fernwärme bis 2050 im Vergleich zu 2030 deutlich ansteigt. Aufgrund des grundsätzlich sinkenden Wärmebedarfs entspricht dies einem deutlichen Anstieg des FW-Anteils an der Wärmeversorgung. Auch der Ausbaubedarf ist bis 2030 sehr groß, sowohl für neue Netze als auch hinsichtlich der Verdichtung und Erweiterung der Bestandsnetze. Abbildung 43 zeigt die Verteilung auf die einzelnen Clusterkategorien. Während die durch Fernwärme bereitgestellte Wärmemenge in den Bestands- und Erweiterungsclustern etwas abnimmt, steigt die Menge in den neu mit Fernwärme versorgten Clustern insbesondere zwischen 2040 und 2050 deutlich an.

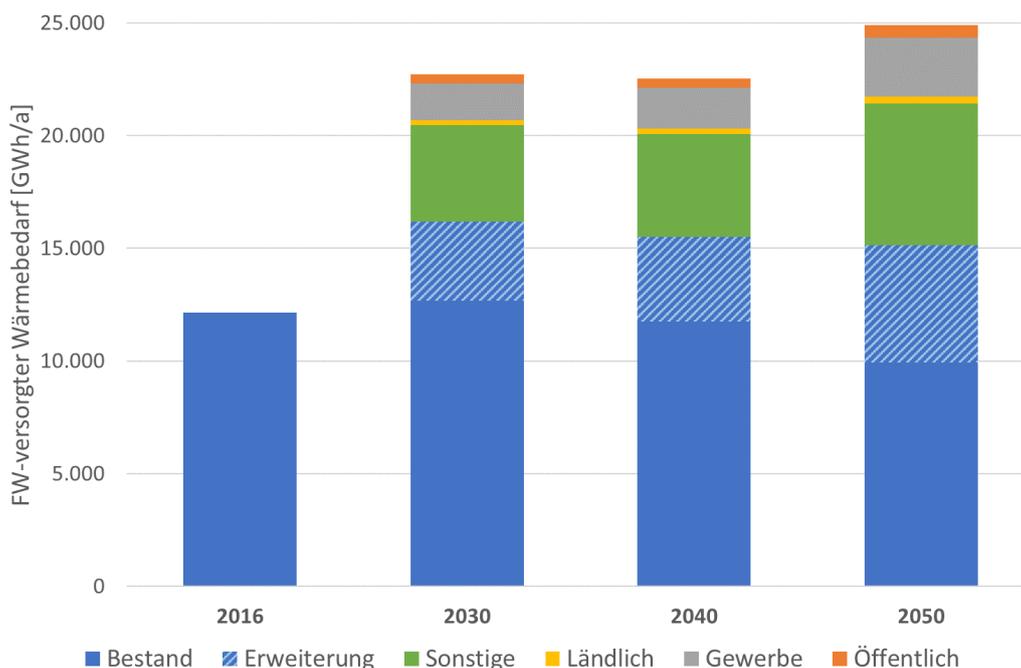


Abbildung 43: Verteilung des Fernwärmebedarfs auf die Clusterkategorien – 80 %-Szenario

Die Verteilung des KWK-Anteils auf die unterschiedlichen Clusterkategorien bezogen auf das gesamte KWK-Potenzial im Jahr 2050 ist Abbildung 44 zu entnehmen. Dabei fällt auf, dass das größte Potenzial auf Bestands- und Erweiterungscluster entfällt.

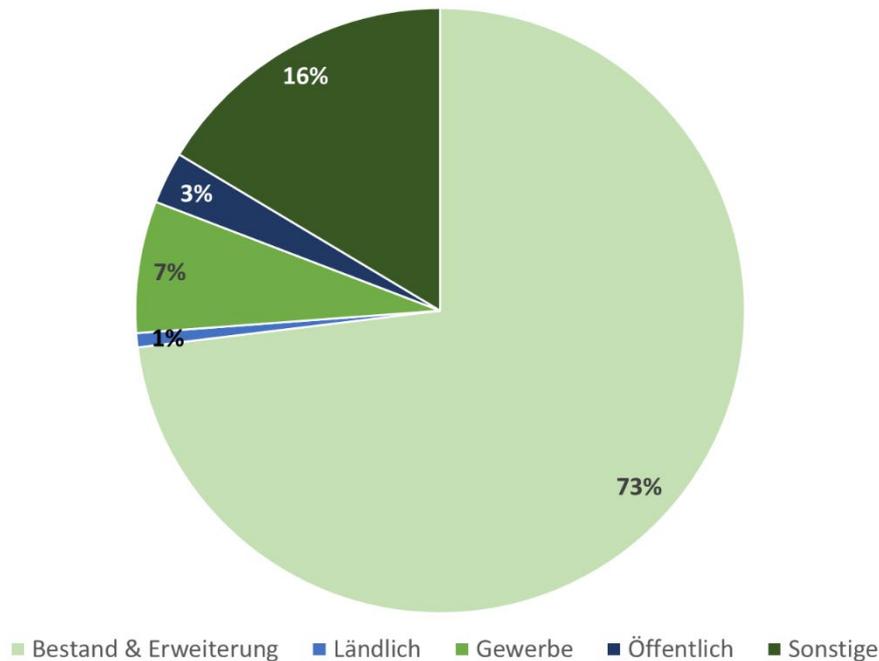


Abbildung 44: Verteilung des KWK-Potenzials auf die Clusterkategorien im Jahr 2050 – 80 %-Szenario

In Abbildung 45 ist die strukturelle Verteilung der Energieträger bzw. Erzeugungstechniken für die Jahre 2030 bis 2050 in Abhängigkeit der Clusterkategorie dargestellt. Zwar ist im 80 %-Szenario die Erdgas-KWK in allen Kategorien im Jahr 2030 die Technik mit den größten Anteilen. Allerdings sinkt dieser Anteil bis 2050 deutlich. Wärmepumpen und Solarthermie kommen im Jahr 2030 zwar in allen Clusterkategorien vor, die Anteile steigen bis zum Jahr 2050 allerdings in unterschiedlichem Maße. Während die Anteile in den neuen Fernwärme-Clustern teilweise erheblich sind, bleiben sie in den Bestands- und Erweiterungsclustern geringer. Ein Grund dafür ist, dass in den Bestands- und Erweiterungsclustern einige Techniken durch die konkrete räumliche Verortung gesetzt sind, wie beispielsweise Abfall oder das Warme Grubenwasser.

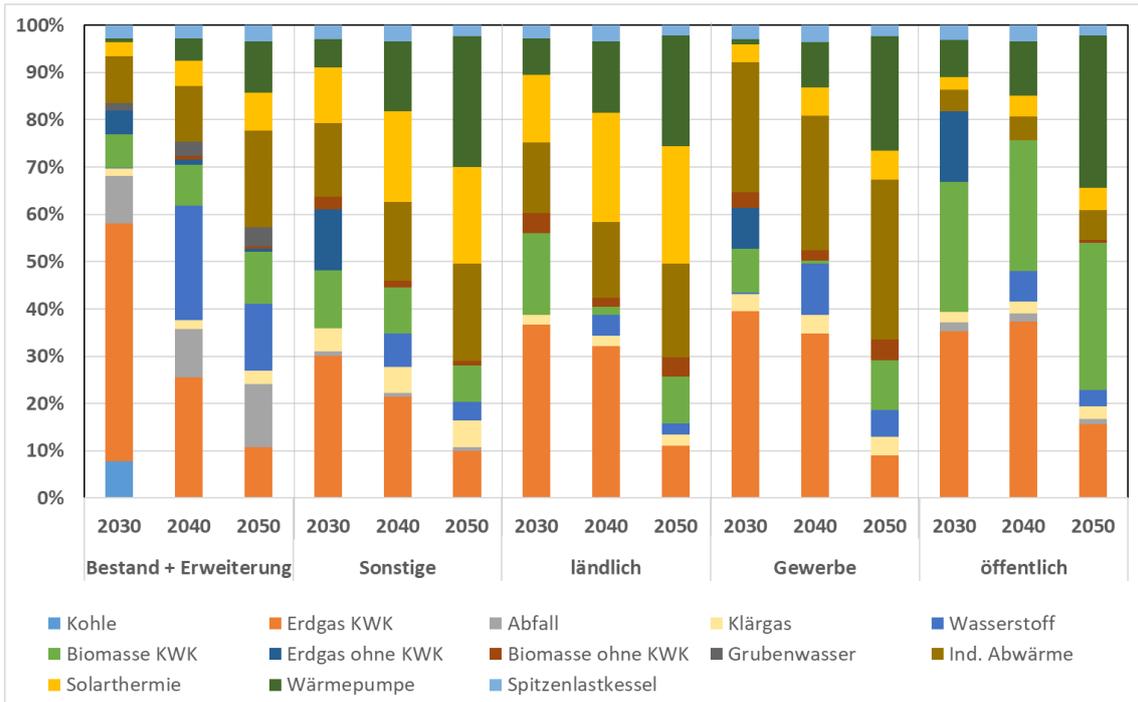


Abbildung 45: Verteilung der Energieträger je Clusterkategorie – 80 %-Szenario

Abbildung 46 zeigt die Verteilung des Wärmebedarfs, der Fernwärmemenge und des KWK-Potenzials im Jahr 2050 in Abhängigkeit von der Einwohnerzahl der Gemeinde. Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass in großen Städten mit mehr als 250.000 Einwohnern anteilig mehr Fernwärme vorhanden sein wird als in kleineren Gemeinden. In den großen Städten ist zudem die Hälfte des gesamten KWK-Potenzials verortet.

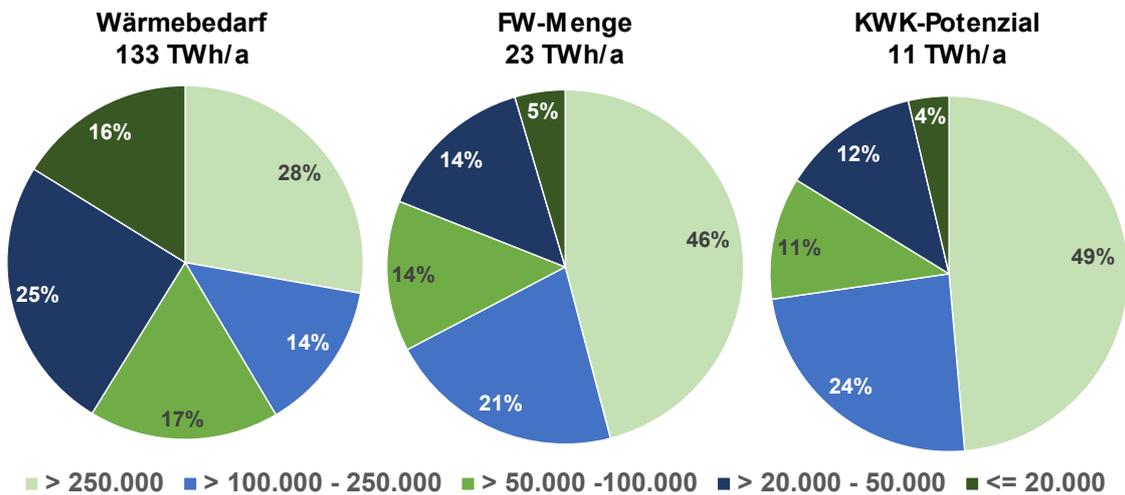


Abbildung 46: Verteilung des Wärmebedarfs, des FW-Bedarfs sowie des KWK-Potenzials in Abhängigkeit von der Einwohnerzahl der Gemeinden im Jahr 2050 – 80 %-Szenario

Auf Ebene der Gemeinden zeigt sich für das KWK-Potenzial schließlich das in Abbildung 47 gezeigte Bild. Es ist erkennbar, dass in allen Gemeinden ein KWK-Potenzial vorhanden ist, wobei der Großteil auf den dicht besiedelten Raum an Rhein und Ruhr fällt, wo auch die meisten Bestandsnetze verortet sind.

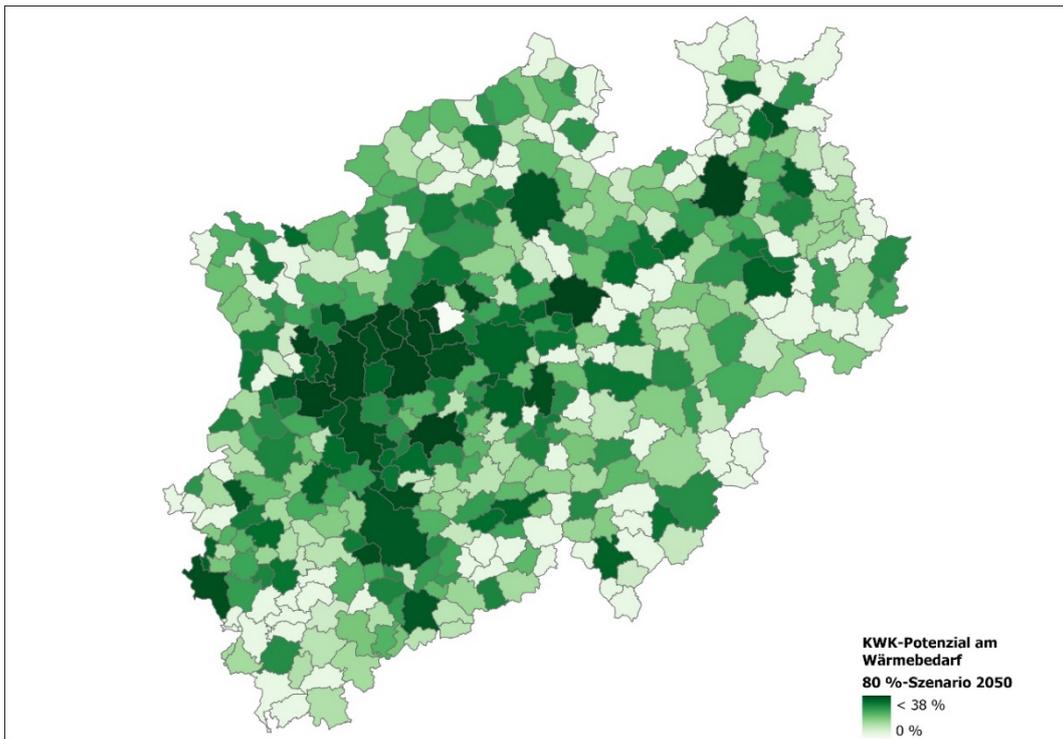


Abbildung 47: KWK-Potenzial auf Ebene der Gemeinden im Jahr 2050 – 80 %-Szenario

Des Weiteren lässt sich auf Ebene der Gemeinden auch das Fernwärme-Potenzial darstellen, also wie hoch der Anteil der Fernwärme am gesamten Wärmebedarf der allgemeinen Versorgung ist (Abbildung 48). Hier zeigt sich, wie auch beim KWK-Potenzial, die Korrelation zwischen dem Potenzial und stark besiedelten Gebieten.

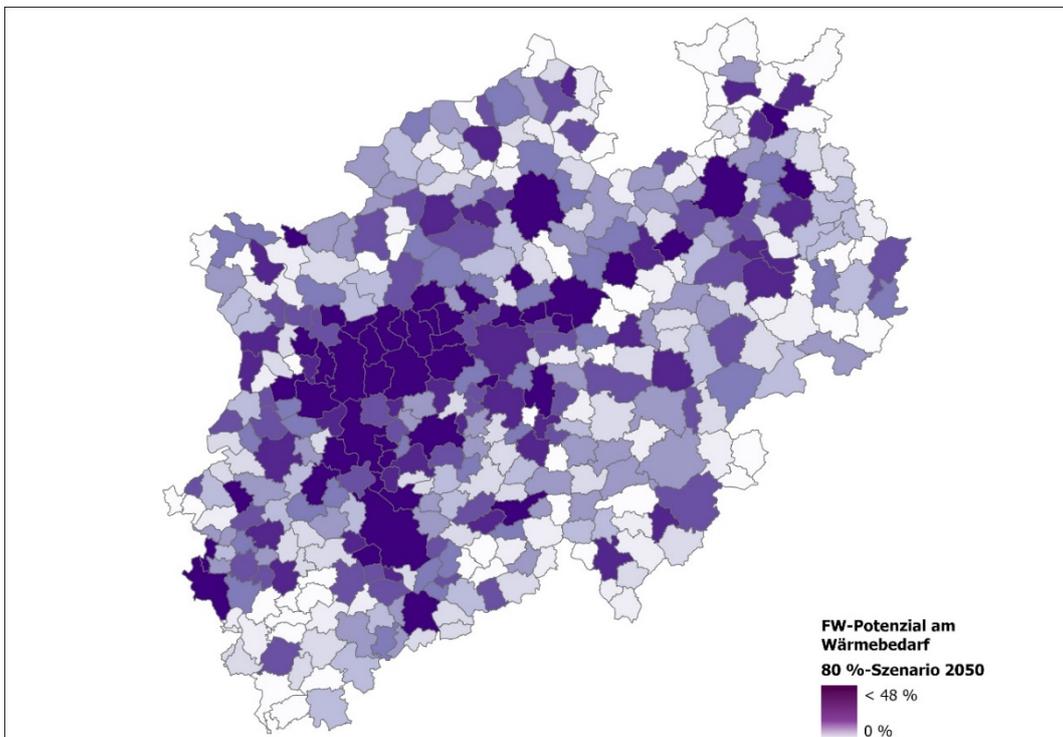


Abbildung 48: Fernwärmepotenzial auf Ebene der Gemeinden im Jahr 2050 – 80 %-Szenario

6.2.2 Klimaneutral-Szenario

Im Klimaneutral-Szenario wird sich die durch Fernwärme gedeckte Wärmemenge bis 2030 von 12 TWh/a auf über 25 TWh/a mehr als verdoppeln. Das geht mit einem erheblichen Bedarf an Netzneubau und -ausbau einher, der noch einmal deutlich über dem des 80 %-Szenarios liegt. In den Folgedekaden bleibt der Wärmebedarf, der durch Fernwärme gedeckt wird, nahezu unverändert. Der steigende Fernwärmeabsatz durch den Ausbau und die Verdichtung der Wärmenetze und die Reduktion des Wärmebedarfs gleichen sich also nahezu aus, obwohl die Reduktion des Wärmebedarfs deutlich über der im 80 %-Szenario liegt. Aus Abbildung 49 geht hervor, dass in den Bestands- und Erweiterungsgebieten die Fernwärmemenge nach 2030 rückläufig ist, während die neuen Netze über die Zeit an Wärmemenge gewinnen. Das ist durch die Annahmen zur unterschiedlichen Entwicklung der Anschlussgrade (s. Tabelle 30) bedingt.

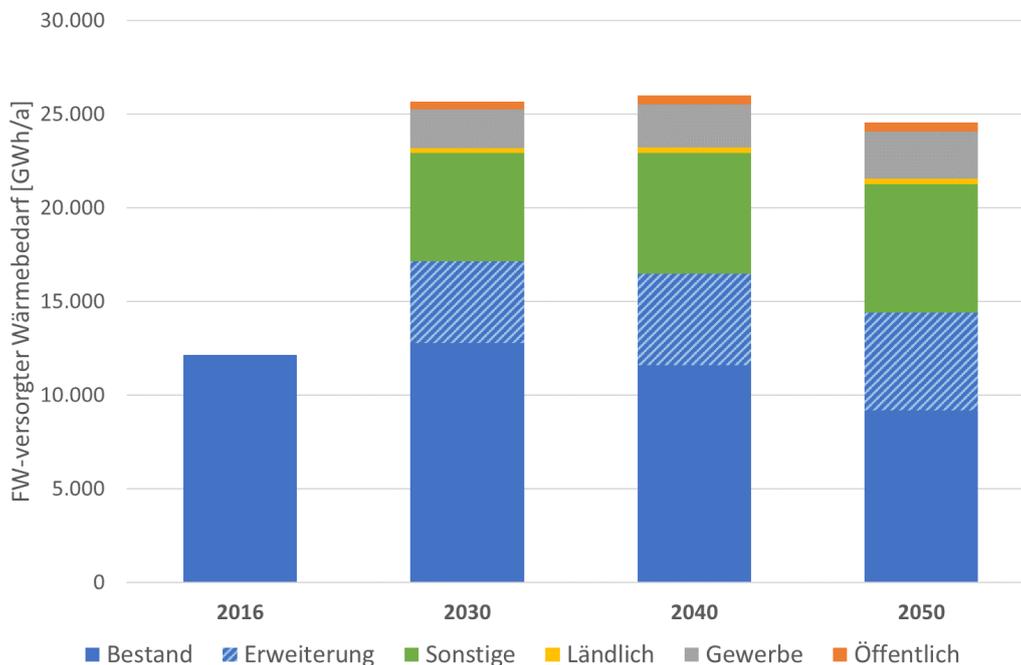


Abbildung 49: Verteilung des Fernwärmebedarfs auf die Clusterkategorien – Kn-Szenario

In beiden betrachteten Szenarien ist die Verteilung des KWK-Anteils auf die Clusterkategorien im Jahr 2050 ähnlich (Abbildung 50). Auch im Klimaneutral-Szenario dominieren Bestands- und Erweiterungscluster das KWK-Potenzial.

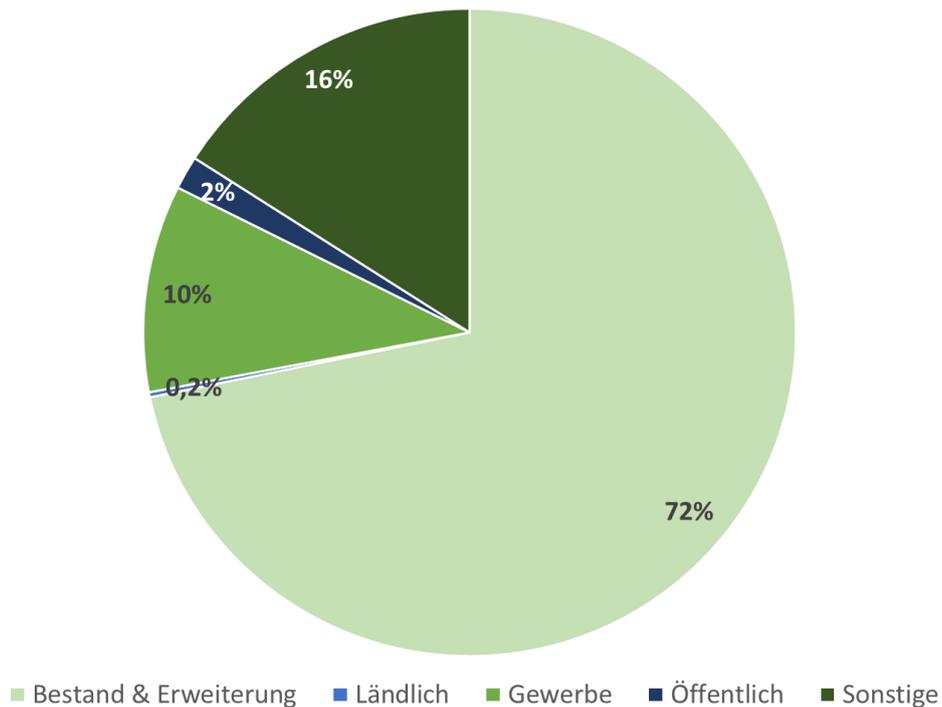


Abbildung 50: Verteilung des KWK-Potenzials auf die Clusterkategorien im Jahr 2050 – Kn-Szenario

In Abbildung 51 ist die strukturelle Verteilung der Erzeugungstechniken bzw. Energieträger für die Jahre 2030 bis 2050 in Abhängigkeit der Clusterkategorie dargestellt. Die Verteilung im Jahr 2030 ist dabei ähnlich zu der im 80 %-Szenario. Erdgas-KWK ist auch im Klimaneutral-Szenario noch die wichtigste Erzeugungstechnik, wenn auch auf niedrigerem Niveau. Im Gegensatz dazu weisen die erneuerbaren Energieträger bereits höhere Anteile auf. Im Jahr 2050 zeigt sich jedoch eine stark veränderte Zusammensetzung der Erzeugung auf Ebene der Kategorien. Erdgas und andere Erzeugungstechniken, deren CO₂-Emissionsfaktor größer Null ist, fallen gänzlich aus dem Erzeugungsmix heraus. Die Lücken werden je nach Clusterkategorie unterschiedlich geschlossen. In den Bestands- und Erweiterungsclustern steigen die Anteile der Techniken mit konkreter räumlicher Verortung weiter an (Abfall, Klärgas und Warmes Grubenwasser), ebenso entfallen jetzt bedeutende Anteile auf den Wasserstoff.

Im Gegensatz zum 80 %-Szenario gibt es jedoch auch in neuen Fernwärmeclustern, insbesondere im Gewerbe, erhebliche Wasserstoff-Anteile. Der Grund dafür liegt in dem deutlich größer angenommenen Wasserstoffnetz. Auf Wärmepumpen und Solarthermie entfallen insbesondere in den neuen Fernwärme-Clustern zum Teil erhebliche Anteile. Durchgängig in allen Clusterkategorien steigt der Anteil der Einbindung der industriellen Abwärme.

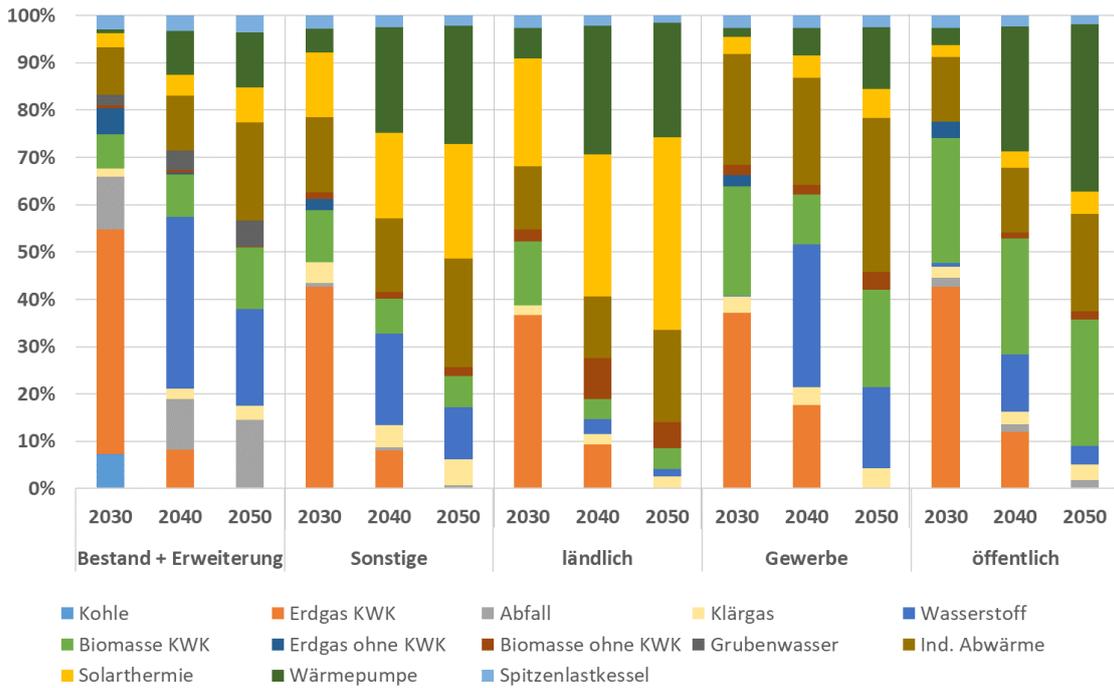


Abbildung 51: Verteilung der Energieträger je Clusterkategorie – Kn-Szenario

Auch in Bezug auf die Verteilungen nach der Einwohnerzahl der Gemeinden (Abbildung 52) setzen sich die Tendenzen aus dem 80 %-Szenario fort. Je mehr Einwohner in der Gemeinde vorhanden sind, umso größer ist das KWK-Potenzial. Diese Behauptung gilt auch für die Fernwärmemenge. Der Wärmebedarf ist jedoch deutlich gleichmäßiger verteilt.

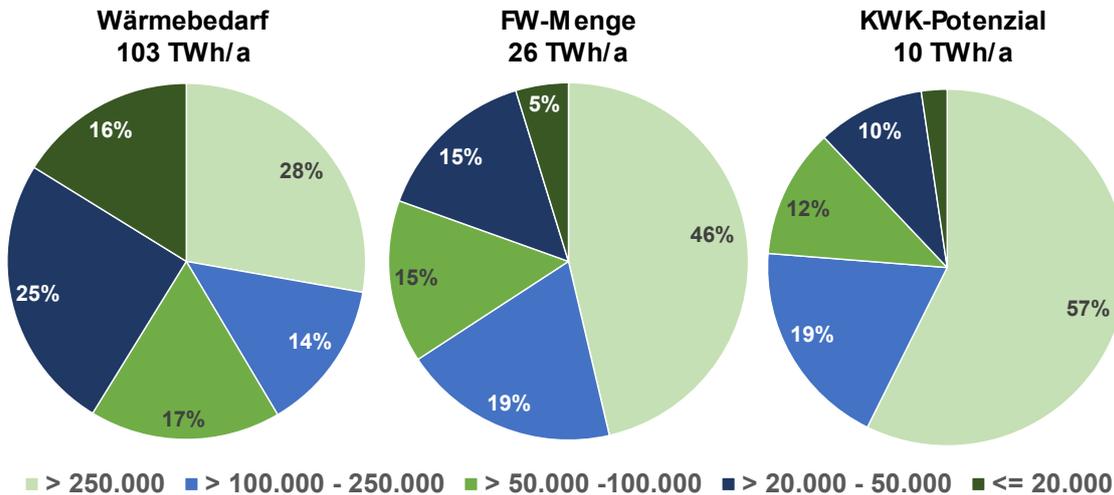


Abbildung 52: Verteilung des Wärmebedarfs, des FW-Bedarfs sowie des KWK-Potenzials in Abhängigkeit von der Einwohnerzahl der Gemeinden im Jahr 2050 –Kn-Szenario

Die Verteilung des KWK-Potenzials im Klimaneutral-Szenario für das Jahr 2050 auf die einzelnen Gemeinden ist Abbildung 53 zu entnehmen. Trotz sinkender KWK-Potenziale in Bezug auf die Fernwärmeerzeugung, steigt das KWK-Potenzial am Gesamtwärmebedarf, was an dem im Vergleich zu den anderen Szenarien deutlich höheren Fernwärme-Anteil liegt.

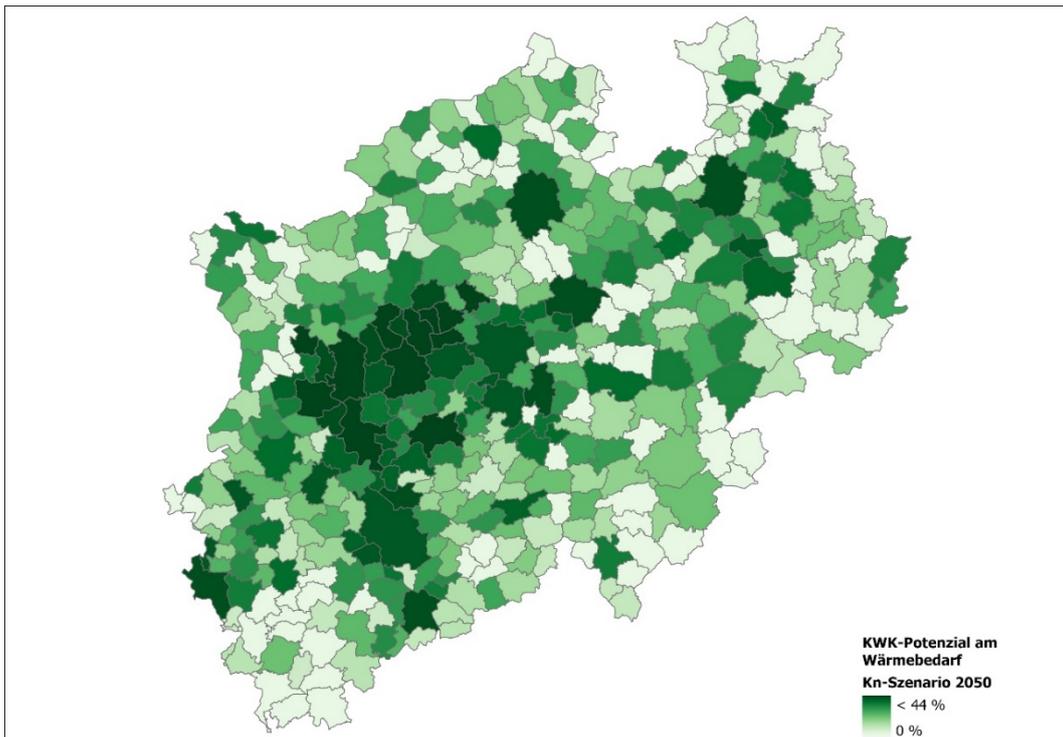


Abbildung 53: KWK-Potenzial auf Ebene der Gemeinden im Jahr 2050 – Kn-Szenario

Entsprechend steigen auch die in Abbildung 54 dargestellten Fernwärme-Potenziale, also wie viel des Gesamtwärmebedarfs der Gemeinden durch Fernwärme gedeckt werden kann. Auch in diesem Szenario wurde für fast alle Gemeinden sowohl ein KWK-Potenzial als auch ein Fernwärme-Potenzial größer Null ausgewiesen.

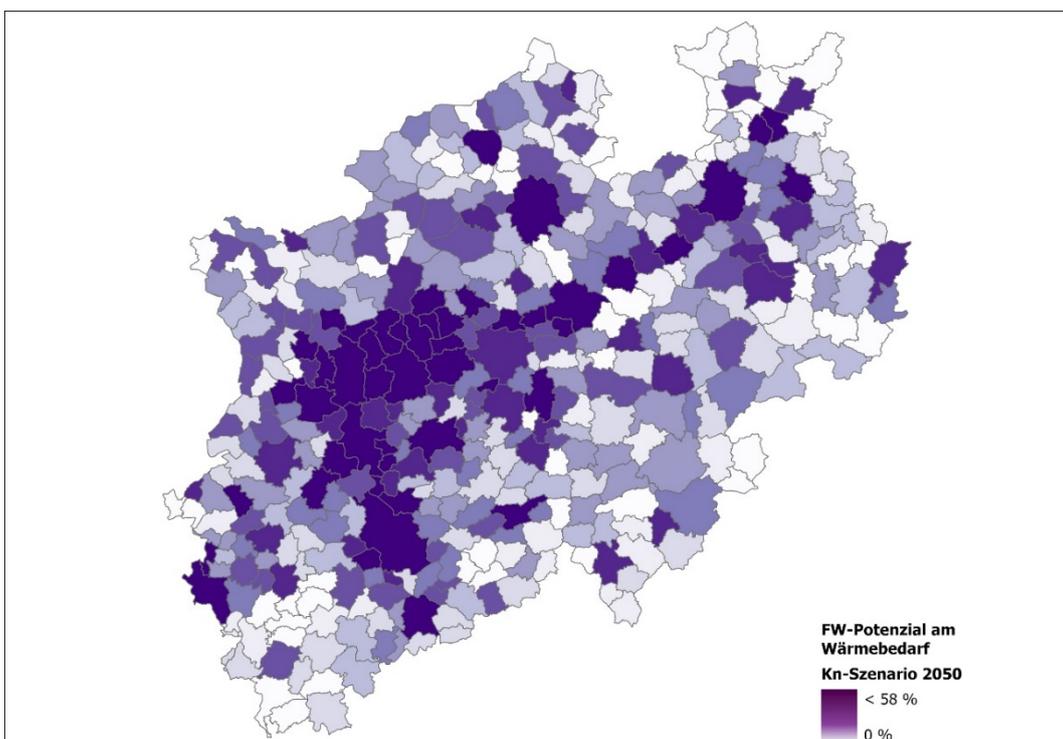


Abbildung 54: Fernwärmepotenzial auf Ebene der Gemeinden im Jahr 2050 – Kn-Szenario

6.3 Theoretisches Fernwärme-Potenzial

Die flächendeckende Clusterung war nicht nur Grundlage für die räumliche und strukturelle Verteilung der KWK-Potenziale, sondern konnte insbesondere zur Ermittlung des Potenzials für den Aus- bzw. Neubau von Wärmenetzen, unabhängig von der Versorgung durch KWK-Technologien, genutzt werden. Das theoretische Fernwärme-Potenzial zeigt demnach, was unter den nachfolgend dargestellten Randbedingungen an Fernwärmeausbau möglich ist, und ist damit unabhängig von den in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Inputwerten aus den Szenarien.

In die Ermittlung des theoretischen Fernwärme-Potenzials flossen alle Cluster ein, deren mittlere Wärmelinien-dichte oberhalb eines Schwellenwertes liegt. Legt man die in den Szenarien angenommenen Schwellenwerte von 750 kWh/m a im Klimaneutral- und 1.000 kWh/m a im 80 %-Szenario als Grenze fest und nimmt zudem die in Tabelle 30 angegebenen Anschlussgrade an, ergeben sich für 2050 die in Tabelle 32 ausgewiesenen Potenziale.

Tabelle 32: Theoretisches Fernwärme-Potenzial im Jahr 2050

	80 %	Kn
Wärmebedarf [GWh/a]	133.726	103.323
FW-Potenzial [GWh/a]	47.017	45.952
Anteil Fernwärme	35,2 %	44,4 %

Das theoretische Potenzial liegt mit 46 TWh/a somit um fast 22 TWh/a höher als das Potenzial aus der Szenarienbetrachtung bzw. der Zielsysteme, welches deutlich mehr Annahmen und Kriterien beinhaltet. Das theoretische Potenzial gibt demnach wider, wie hoch der Anteil der Fernwärme aufgrund der räumlichen Gegebenheiten und des vor Ort existierenden Wärmebedarfs steigen kann.

Wird der Schwellenwert in Höhe von 750 kWh/m² a für alle Cluster angewendet, ergibt sich das in Abbildung 55 dargestellte Bild. In allen blau eingefärbten Clustern liegt die mittlere Wärmelinien-dichte über dem Grenzwert von 750 kWh/m a. Der Wärmebedarf der Gebäude innerhalb dieser Cluster wurde dabei zur Ermittlung des theoretischen Fernwärme-Potenzials auf Ebene der Gemeinden herangezogen. Dies sind also Bereiche, in denen ein Fernwärmeausbau auf Grundlage des oben angenommenen Grenzwerts möglich ist.

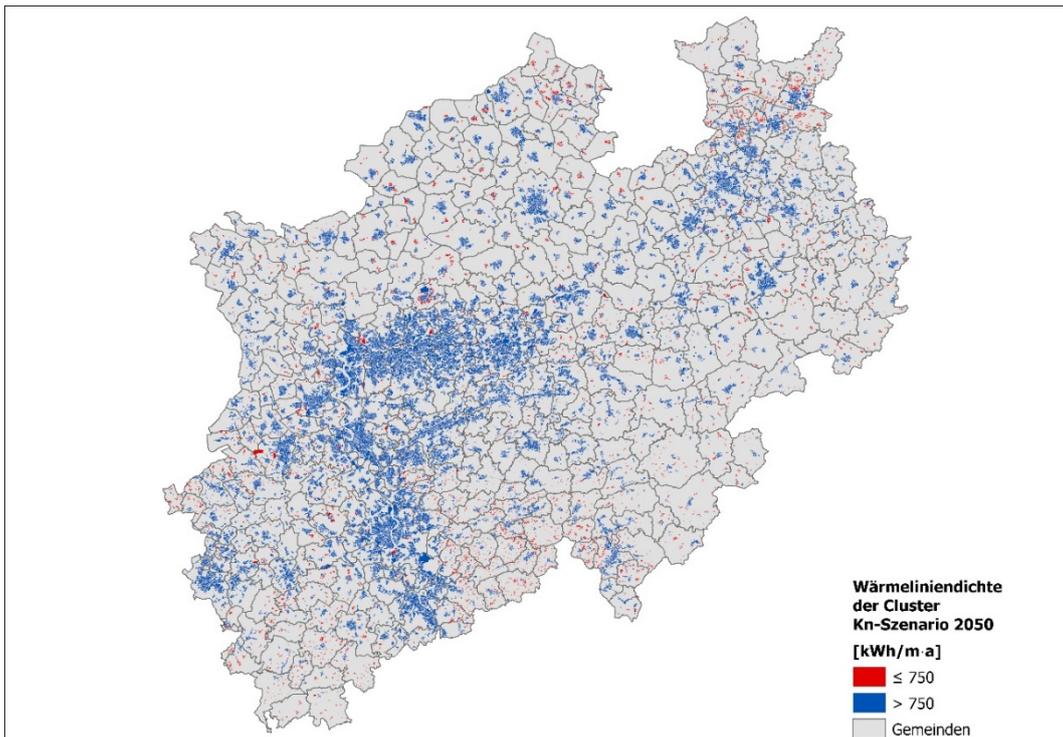


Abbildung 55: Mittlere Wärmeliniendichte im Jahr 2050 – Kn-Szenario

Abbildung 56 zeigt das Ergebnis für das Klimaneutral-Szenario im Jahr 2050 in der räumlichen Verteilung auf Ebene der Gemeinden als Anteile am Wärmebedarf.

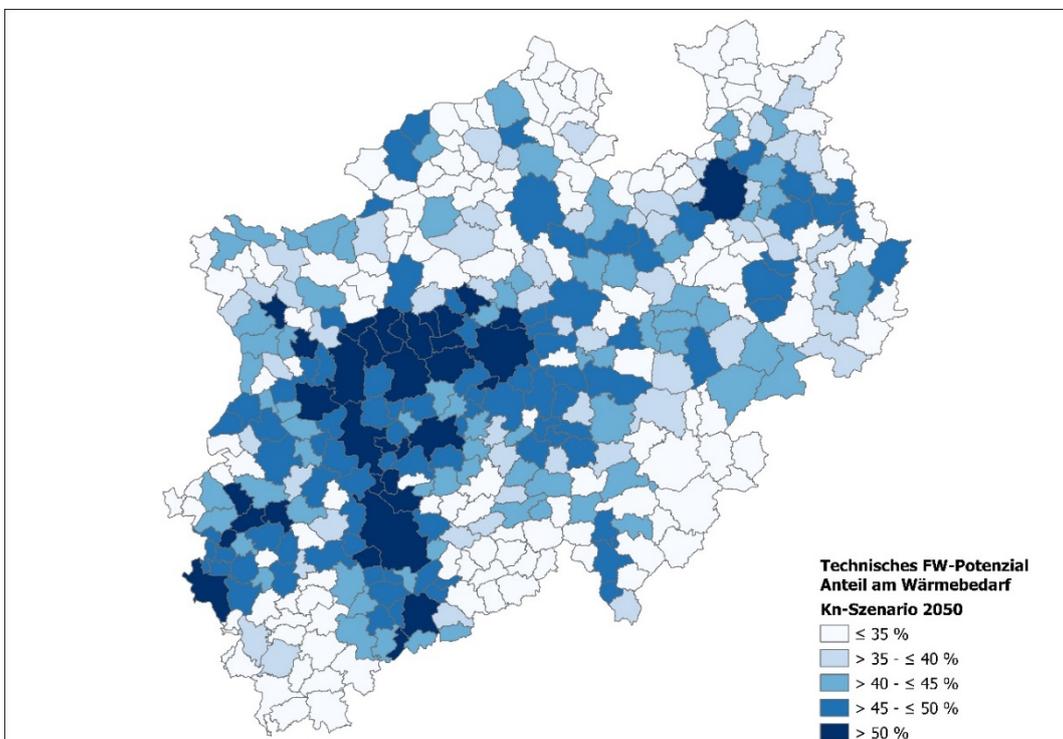


Abbildung 56: Theoretisches Fernwärme-Potenzial je Gemeinde im Jahr 2050 – Kn-Szenario

Hier ist deutlich zu erkennen, dass es vor allem im Bereich des Ruhrgebiets und entlang des Rheins mehrere Gemeinden gibt, die im Jahr 2050 ihren Wärmebedarf über mehr als die Hälfte mit Fernwärme versorgen können. Dies sind vielfach die Städte, in denen jetzt schon ein Fernwärmenetz existiert.

Vergleichbare Auswertungen sind mit anderen Schwellenwerten für die mittlere Wärmeliniendichte oder anderen Annahmen zum Anschlussgrad leicht durchführbar. Tabelle 33 können die Ergebnisse für das Klimaneutral-Szenario für das Jahr 2050 bei einer Variation der mittleren Wärmeliniendichte bzw. dem Anschlussgrad entnommen werden.

Tabelle 33: Theoretisches Fernwärme-Potenzial nach Anschlussgrad und Mindestwärmeliniendichte im Jahr 2050 – Kn-Szenario (Angabe in TWh/a)

Wärmeliniendichte [kWh/m a]				
Anschlussgrad	750	1.000	1.250	1.500
40%	35,0	28,9	22,3	16,6
50%	43,8	36,2	27,8	20,8
60%	52,5	43,4	33,4	24,9
70%	61,3	50,6	39,0	29,1

Es zeigt sich, dass mit steigendem Anschlussgrad und sinkender Wärmeliniendichte das theoretische Fernwärme-Potenzial deutlich steigt. Aus den hier ausgewiesenen Zahlen lässt sich sehr gut die Relevanz des Fernwärmeausbaus und der Verdichtung von Fernwärmenetzen ableiten. So steigt das Fernwärme-Potenzial um rund 75 %, wenn man den Anschlussgrad von 40 % auf 70 % erhöht, also in einem Netzgebiet mehr Gebäude mit Fernwärme versorgt. Zum anderen wird das theoretische Fernwärme-Potenzial mehr als verdoppelt, wenn man den Schwellenwert der Wärmeliniendichte in den Clustern herabsenkt und somit mehr Gebiete mit Fernwärme versorgt werden.

7 Bewertung der Ergebnisse

Zweck und Aufgabe der vorliegenden Studie war es, die Potenziale zur Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) für Nah- und Fernwärme (Allgemeine Versorgung) sowie der energieintensiven Industrie in Nordrhein-Westfalen in zwei zuvor definierten Szenarien (80 % und Klimaneutral) jeweils für die drei Zeitpunkte 2030, 2040 und 2050 zu ermitteln. Dadurch kann die Studie eine wichtige Grundlage bilden, um die notwendige Transformation und den Ausbau der Wärmenetze in NRW mit ihren heute noch überwiegend fossilen Wärmeerzeugern so zu gestalten, dass das Ziel der Klimaneutralität auch in diesem Sektor erreicht werden kann.

7.1 Zentrale Erkenntnisse

Aus den im Rahmen der Studie durchgeführten Arbeiten und Analysen können, mit dem Ziel der Erreichung der Klimaneutralität der leitungsgebundenen Wärmeversorgung bis 2050, folgende grundlegende Erkenntnisse abgeleitet werden:

1. Es ist ein deutlicher Ausbau der Nah- und Fernwärme in NRW notwendig
2. Der Anteil der KWK an der leitungsgebundenen Wärmeversorgung wird abnehmen, aber weiter eine wichtige Rolle einnehmen
3. Der Energiemix der KWK muss sich deutlich verändern
4. Der Einsatz von erneuerbaren und klimafreundlichen Energien in der allgemeinen Versorgung und der Industrie muss im Rahmen des Transformationsprozesses deutlich zunehmen
5. Wasserstoff wird auch bei der KWK-Wärmeversorgung eine große Rolle einnehmen
6. Das Potenzial der industriellen Abwärme muss deutlich stärker genutzt werden
7. Die Ergebnisse der Studie bieten einen erheblichen Mehrwert für die kommunale Wärmeplanung vor Ort

Die zentralen Kernaussagen sind Ableitungen aus den Ergebnissen der Analyse und werden im Folgenden näher erläutert.

Erkenntnis 1 Es ist ein deutlicher Ausbau der Nah- und Fernwärme in NRW notwendig

- Die Fernwärme wird bei der Erreichung der Klimaneutralität im Wärmebereich eine zentrale Rolle einnehmen
- Der Fernwärmebedarf (Allgemeine Versorgung & Industrie) muss sich dafür insgesamt deutlich erhöhen von heute (2016) ca. 28 TWh/a auf 38 TWh/a im Jahr 2030. Aufgrund des stark sinkenden Wärmebedarfs sinkt der absolute Fernwärmebedarf bis 2050 dann auf ca. 35 TWh/a ab, der Anteil am Wärmebedarf steigt jedoch von 17 % 2030 auf 26 % im Jahr 2050

- Für die Allgemeine Versorgung bedeutet dies eine Fernwärmeerzeugung von 29 TWh/a im Jahr 2030 und 27 TWh/a bis zum Jahr 2050 (bzw. ein Fernwärmebedarf von 25,7 TWh/a im Jahr 2030 und 24,5 TWh/a 2050), bei einem Wärmebedarf der allgemeinen Versorgung von 185 TWh/a in 2030 und 103 TWh/a in 2050, steigt der FW-Anteil von 14 % (2030) auf 24 % (2050)
- Der Fernwärmebedarf lässt sich mit sinkender minimaler Wärmeliniendichte (750 kWh/m a) und steigendem Anschlussgrad (50-70 %) sogar auf 46 TWh/a im Jahr 2050 steigern, was dann 45 % des Wärmebedarfs der Allgemeinen Versorgung ausmacht
- Auch wenn das größte Fernwärme-Potenzial in den Gebieten vorhanden ist, wo jetzt schon ein Fernwärmenetz besteht, so hat bis auf wenige Ausnahmen jede Gemeinde in NRW ein theoretisches Fernwärmeausbaupotenzial

Erkenntnis 2

Der Anteil der KWK an der leitungsgebundenen Wärmeversorgung wird abnehmen, aber weiter eine wichtige Rolle einnehmen

- Der Anteil der KWK an der allgemeinen Wärmeversorgung beträgt im Jahr 2030 ca. 70 % (20 TWh/a) und sinkt bis zum Jahr 2050 auf 42 % (11 TWh/a). Die KWK-Wärmeerzeugung wird dann vollkommen auf Basis erneuerbarer und klimafreundlicher Energieträger erfolgen müssen
- Bei der energieintensiven Industrie werden im Jahr 2030 noch 85 % der Wärme (35 TWh/a) unter 500 °C über KWK erzeugt. Dieser Wert sinkt anschließend um knapp die Hälfte auf 42 % (14 TWh/a). Auch hier muss die KWK-Wärmeerzeugung dann vollkommen auf Basis erneuerbarer und klimafreundlicher Energieträger erfolgen
- Auch wenn das größte KWK-Potenzial in dicht besiedelten Gebieten mit einer hohen Wärmedichte herrscht und auch stark von der Industrie vor Ort abhängig ist, existiert bis auf wenige Ausnahmen in jeder Gemeinde ein KWK-Potenzial

Erkenntnis 3

Der Energiemix der KWK muss sich deutlich verändern

- Derzeit beruht die KWK-Wärmeerzeugung zum großen Teil auf den fossilen Energieträgern Erdgas, Stein- und Braunkohle. Durch den beschlossenen Kohleausstieg und dem stark sinkenden CO₂-Budget in der Wärmeversorgung, darf es spätestens im Jahr 2050 (bzw. 2045) keine KWK auf Basis fossiler Brennstoffe mehr geben
- Diese Rolle übernehmen dann bei der allgemeinen Versorgung folgende Energieträger (Anteile an der KWK-Wärmeerzeugung):
 - Wasserstoff 4,7 TWh/a – 41 %
 - Biomasse 3,3 TWh/a – 29 %
 - Abfall 2,4 TWh/a – 21 %
 - Klärgas 1,0 TWh/a – 9 %.

- In der Industrie (< 500 °C) spielt Wasserstoff bei der KWK-Wärmeerzeugung eine noch größere Rolle:
 - Wasserstoff 11,0 TWh/a – 78 %
 - Biomasse 2,4 TWh/a – 16 %
 - Abfall 0,5 TWh/a – 4 %
 - Klärgas 0,2 TWh/a – 2 %.

Erkenntnis 4 Der Einsatz von erneuerbaren und klimafreundlichen Energien in der allgemeinen Versorgung und der Industrie muss im Rahmen des Transformationsprozesses deutlich zunehmen

- Eine klimaneutrale Wärmeversorgung ist nur mit dem Einsatz erneuerbarer und klimafreundlicher Energien möglich, besonders der Anteil industrieller Abwärme muss deutlich gesteigert werden
- In der Allgemeinen Versorgung wird bis 2050 ein deutlicher Zuwachs des Anteils industrieller Abwärme auf 6,1 TWh/a, der Wärmepumpe (4,3 TWh/a) und von Wasserstoff (5,4 TWh/a) erwartet, jedoch nehmen auch die große Solarthermie (3,3 TWh/a), Abfall (2,4 TWh/a), Klärgas (1,0 TWh/a) und die Bioenergie (3,6 TWh/a) sowie in einem geringeren Umfang auch warmes Grubenwasser (0,8 TWh/a) eine bedeutende Rolle ein. Der Mix hängt regional von der Verfügbarkeit der jeweiligen Energieträger ab, ist für ganz NRW betrachtet jedoch relativ homogen.
- Bei der energieintensiven Industrie (< 500°C) ist der Mix der Energieträger im Jahr 2050 deutlich heterogener. Hier wird fast die Hälfte des Wärmebedarfs über Wärmepumpen (15,4 TWh/a) zur Verfügung gestellt und 34 % (11,5 TWh/a) über Wasserstoff. Auch die Bioenergie wird mit 10 % (3,3 TWh/a) eine entscheidende Rolle einnehmen. Weitere erneuerbare und klimafreundliche Energieträger spielen nur eine untergeordnete Rolle, da Sie lediglich in dem Fernwärmeanteil der Industrie enthalten sind.
- Durch den großen Anteil, den Wärmepumpen und grüner Wasserstoff bei der Fernwärme und der Wärmeversorgung der Industrie einnehmen werden, ist der Stromnetzausbau je nach Standort auch für die Wärmeversorgung in NRW ein wichtiger Baustein.

Erkenntnis 5 Wasserstoff wird auch bei der KWK-Wärmeversorgung eine große Rolle einnehmen

- In Zukunft wird Wasserstoff eine zentrale Rolle bei der Wärmeversorgung der energieintensiven Industrie (< 500°C) und der allgemeinen Versorgung (Fernwärme, ohne Industrie) einnehmen. Im Jahr 2050 werden dann insgesamt 17 TWh/a an Wasserstoff benötigt
- Aufgrund des hohen Bedarfs an Wasserstoff der Industrie allgemein und dem Sektor Verkehr in NRW, können hier bei zunehmenden Infrastrukturausbau Synergieeffekte zwischen den Sektoren entstehen

Erkenntnis 6 Das Potenzial der industriellen Abwärme muss deutlich stärker genutzt werden

- Die Potenzialstudie Industrielle Abwärme zeigt bereits das sehr hohe energetische Potenzial in NRW. Insgesamt könnten demnach 44 – 48 TWh/a genutzt werden.
- Für die leitungsgebundene Wärmeversorgung in NRW werden bis zum Jahr 2050 insgesamt 7,4 TWh an industrieller Abwärme benötigt. Dies entspricht lediglich 16 % des vorhandenen Potenzials, sodass bei zusätzlichen Anstrengungen, das vorhandene Potenzial umzusetzen, die Zielgröße für die Wärmeversorgung in NRW erreicht werden kann

Erkenntnis 7 Die Ergebnisse der Studie bieten einen erheblichen Mehrwert für die kommunale Wärmeplanung vor Ort

- Die Ergebnisse und vor allem die räumlichen Auswertungen bieten einen erheblichen Mehrwert über die zentralen KWK- und Fernwärmepotenziale hinaus. Da nun ein Großteil der Wärmenetze und weitere wichtige Kennwerte, wie die Wärmelinienichte und die Clustereinteilung mit den dazu gehörenden Kennwerten, für ganz NRW räumlich aufgelöst vorliegen, ist hier eine große Datenbasis für die kommunale Wärmeplanung vor Ort entstanden
- Die räumlichen Ergebnisse werden im Energieatlas NRW (www.energieatlas.nrw.de) veröffentlicht und können seitens der Kommunen, Planer und Energieversorger genutzt werden, um die eigene Wärmeplanung voranzutreiben

7.2 Einordnung der Ergebnisse

Obwohl im Rahmen der vorliegenden Potenzialstudie nicht nur die KWK, sondern das gesamte Wärmesystem der Fernwärme und der energieintensiven Industrie in Nordrhein-Westfalen skizziert wurde, war die Gewichtung von verschiedenen Einflussfaktoren und Randbedingungen unterschiedlich. An dieser Stelle werden einige wichtige Punkte nochmal aufgegriffen und erläutert.

Die erwartete Entwicklung der erneuerbaren Wärmeerzeugung basiert auf vorhandenen Studien, die um eigene Analysen ergänzt wurden. Es konnte jedoch nicht im Detail jeder potenzielle Energieträger detailliert bewertet werden. Die tiefe Geothermie z. B. ist nicht Bestandteil der berücksichtigten Potenziale, da aus heutiger Sicht hohe Unsicherheiten bzgl. der Entwicklung dieser Technologie in NRW bestehen und keine ausreichend verlässlichen Aussagen zum erwarteten energetischen Potenzial gemacht werden konnten. Die Fortschreibung der industriellen Abwärmenutzung wurde auf Basis der BDI-Szenarien für Deutschland [BCG & Prognos, 2018] abgeschätzt, da durch die Potenzialstudie Industrielle Abwärme zwar Daten zu heutigen Potenzialen vorhanden sind, aber nicht für die Zukunft vorlagen.

Darüber hinaus wurden sowohl Annahmen für zukünftige Energiekosten und spezifische CO₂-Emissionen für z. B. Strom und grünen Wasserstoff, als auch Annahmen zu Investitionskosten getroffen. Diese sind jedoch wie alle getroffenen Annahmen mit Unsicherheiten behaftet, da der Markt immer wieder schnelle Veränderungen erfährt.

Die Objekt-KWK, also einzelne Anlagen, die Wohnhäuser oder Gewerbegebäude sowohl mit Strom als auch mit Wärme versorgen, wurde in dieser Studie nicht untersucht. Das KWK-Potenzial ist also bei Betrachtung der Objekt-KWK nochmal höher als der in dieser Studie für die allgemeine Versorgung und die energieintensive Industrie ermittelte Wert.

Die Betrachtungen zur Deckung der Wärmebedarfe haben auch die Stromseite berücksichtigt. Da es sich bei dieser Studie um eine Studie zur Wärmeversorgung handelt, hat jedoch kein bilanzieller Abgleich mit zukünftig erwarteten Residuallasten stattgefunden. Dies bedeutet, dass für die Berechnung der Wärmegestehungskosten die mittleren angenommenen Strompreise verwendet wurden, aber keine Prüfung über die Höhe des Strombedarfs erfolgte.

Es ist sinnvoll die Ergebnisse der Studie in einem geringeren Umfang in wenigen Jahren auf Basis der dann aktuell gültigen Rahmenbedingungen zu aktualisieren. Hierzu gehören u. a. die neuen Ziele der Treibhausgasneutralität bis 2045 mit ebenfalls neuen Zwischenzielen für die CO₂-Reduktion bis 2030 und 2040 sowie aktualisierte Rahmenbedingungen zu den Strom- und CO₂-Preisen. Auch die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff hatte einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse der Studie. Bei neuen Erkenntnissen zur Wasserstoffinfrastruktur und der Erzeugung des Wasserstoffs, können noch genauere Aussagen zu diesem Energieträger bei der Wärmeversorgung getroffen werden. Zudem ist der Einsatz von Wärmepumpen bei der hier vorgenommenen Methodik stark abhängig von den CO₂-Emissionen im Stromsektor, der auf Basis der neuen Zielsetzung bis 2045 bereits 2040 fast vollständig dekarbonisiert sein muss. Daraus kann sich ergeben, dass die Attraktivität der Wärmepumpe als klimaneutrale Wärmetechnologie schneller zunimmt, als dies zum Zeitpunkt der Modellierung der Ergebnisse angenommen wurde.

Es ist schon jetzt absehbar, dass KWK-Anlagen zukünftig durch steigende Anteile Erneuerbarer Energien an der Strom- und Wärmeerzeugung größeren wirtschaftlichen Herausforderungen gegenüberstehen. Durch sinkende Einsatzzeiten und erzielbare Stromerlöse der KWK wird – sofern sich die aktuelle Marktausgestaltung nicht substantiell ändert – deren Wirtschaftlichkeit beeinträchtigt. Dies liegt darin begründet, dass die Nutzung von Abwärme und Wärmepumpen durch ihre hohe Effizienz in der Zukunft voraussichtlich geringere Betriebskosten im Vergleich zur KWK aufweisen werden.

Zudem bleibt festzuhalten, dass, wenn die Reduktion des Wärmebedarfs und der Ausbau erneuerbarer und klimafreundlicher Wärmequellen nicht gelingt, zur Kompensation noch größere Mengen an erneuerbarem Strom und erneuerbarem Wasserstoff erforderlich sein werden, um die Klimaneutralität bei der Wärmeversorgung in NRW erreichen zu können.

Literatur

- [AGEB, 2021] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB), *Anwendungsbilanzen*, Abrufbar unter: <https://ag-energiebilanzen.de/8-0-Anwendungsbilanzen.html> (Abruf zuletzt: 09.09.2021)
- [AMMERMANN ET AL., 2015] Ammermann, H., Hoff, P., Atanasiu, M., Aylor, J., Kaufmann, M., Tisler, O., *Advancing Europe's energy systems: Stationary fuel cells in distributed generation*, Luxemburg, 2015
- [ANGERMEIER, 2016] Angermeier, G., *SWOT-Analyse*, Projektmagazin, 2016
- [ASUE, 2010] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., *BHKW-Grundlagen*, 2010, Abrufbar unter: https://asue.de/sites/default/files/asue/themen/blockheizkraftwerke/2010/broschueren/06_06_10_bhkw-grundlagen-2010.pdf (Abruf: 10.03.2020)
- [BCG & PROGNOSE, 2018] The Boston Consulting Group und Prognos AG, *Klimapfade für Deutschland*, 2018
- [BDEW, 2019] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., *BDEW-Strompreisanalyse Januar 2020*, 2020
- [BEE, 8KU & AGFW, 2020] Bundesverband Erneuerbare Energien e.V., 8KU GmbH & AGFW – Der Effizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., *Strategien zur Treibhausgasreduktion und zum systemrelevanten Ausbau der leitungsgebundenen Wärme und Kälte in Deutschland*, 2020
- [BINE, 2010] BINE 2010: *Neue Kraftwerke mit fossilen Brennstoffen - Energieeffizient und umweltschonend*, Themeninfo II/2010, BINE Informationsdienst FIZ Karlsruhe, Karlsruhe, 2010
- [BMBF, 2020] Bundesministerium für Bildung und Forschung, *Eine kleine Wasserstoff-Farbenlehre*, Abrufbar unter <https://www.bmbf.de/de/eine-kleine-wasserstoff-farbenlehre-10879.html> (Abruf: 09.09.2021)
- [BNETZA, 2019] Bundesnetzagentur, *Monitoringbericht 2019*, 2019, Abrufbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Berichte/2019/Monitoringbericht_Energie2019.pdf?__blob=publicationFile&v=5 (Abruf: 07.09.2020)
- [BUNDESREGIERUNG, 2019] Bundesregierung (Hrsg.), *Gesetz zur Einführung eines Bundes-Klimaschutzgesetzes und zur Änderung weiterer Vorschriften*, 2019
- [BUNDESREGIERUNG, 2021] Bundesregierung (Hrsg.), *Generationenvertrag für das Klima*, Abrufbar unter: <https://www.bundesregierung.de/bregde/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672> (Abruf: 03.08.2021)
- [Brötje, 2019] Brötje Heizung, *Wasserstoffbetriebener Heizkessel als Zukunftsmodell*, Abrufbar unter: <https://www.broetje.de/de/broetje/presse/aktuelle-presse-meldungen/wasserstoffbetriebener-heizkessel-als-zukunftsmodell> (Abruf: 09.09.2021)

- [C.A.R.M.E.N., 2020] Centrales Agrar-Rohstoff Marketing und Energie-Netzwerk e.V., *Der ORC-Prozess in der Bioenergie*, Abrufbar unter: www.carmen-ev.de/biogene-festbrennstoffe/biomasseheizkraftwerke/orc-technik/76-der-orc-prozess-in-der-bioenergie, (Abruf: 12.03.2020)
- [CHEMIEATLAS, 2020] Chemieatlas.de, *Chemiestandorte im Ruhrgebiet*, Abrufbar unter: <https://www.chemieatlas.de/standort-infrastruktur/chemiestandorte> (Abruf: 26.02.2020)
- [DENA, 2021] Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.), *e-Highway2050*, Abrufbar unter: <https://docs.entsoe.eu/baltic-conf/bites/www.e-highway2050.eu/e-highway2050/> (Abruf: 16.08.21)
- [DEUTSCHER BUNDESTAG, 2019] Deutscher Bundestag (Hrsg.), *Grenzwerte für Wasserstoff (H₂) in der Erdgasinfrastruktur*, 2019
- [DLR, 2019] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, *Wärmespeicherkraftwerke – Positionspapier des DLR zum Umbau von Kohlekraftwerken auf einen CO₂-neutralen Betrieb*, 2019
- [EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2020] Europäische Kommission, *Amended proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulation (EU) 2018/1999 (European Climate Law)*, 2020
- [EWI, 2017] Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln gGmbH, *Energiemarkt 2030 und 2050 – Der Beitrag von Gas- und Wärmeinfrastruktur zu einer effizienten CO₂-Minderung*, 2017, Abrufbar unter: https://www.ewi.research-scenarios.de/cms/wp-content/uploads/2017/11/ewi_ERS_Energiemarkt_2030_2050.pdf (Abruf: 08.09.2020)
- [FNB GAS, 2020] Die Fernleitungsnetzbetreiber, *Netzentwicklungsplan Gas 2020 – 2030 – Entwurf*, 2020
- [GEOBASIS NRW, 2020] Bezirksregierung Köln, *Digitales Basis-Landschaftsmodell*, Abrufbar unter: <https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/lm/basis-dlm/> (Abruf: 25.02.2020)
- [GEOBASIS NRW, 2021] Bezirksregierung Köln, *3D-Gebäudemodell LoD1*, Abrufbar unter: https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/3dg/lod1_gml/
- [IEA, 2018] International Energy Agency, *World Energy Outlook 2018*, 2018
- [IEA, 2019] International Energy Agency, *The Future of Hydrogen, Seizing today's opportunities, Report prepared by the IEA for the G20, Japan, France*, 2019
- [IFAM, 2018] Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung, *Kurzstudie zur Rolle der KWK in der Energiewende*, 2018
- [IFEU, 2014] ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, *Empfehlungen zur Methodik der kommunalen Treibhausgasbilanzierung für den Energie- und Verkehrssektor in Deutschland*, 2014

- [IZES, 2015] IZES gGmbH, *Impulsvortrag: Grundlagen der Abwärmenutzung*, 2015, Abrufbar unter:
http://www.izes.de/sites/default/files/publikationen/Veranstaltungen/BMUB_Abwaermnutzung_Taenzer.pdf (Abruf: 12.03.2020)
- [IZES, 2016] IZES gGmbH, *Technologieeinführungsprogramm für stationäre Brennstoffzellen*, 2016, Abrufbar unter:
http://www.izes.de/sites/default/files/publikationen/20160122_Endbericht_TEP_Stat._Brennstoffzellen.pdf (Abruf: 11.03.2020)
- [IT NRW, 2017] Information und Technik NRW, *Zensus 2011, Gebäude und Wohnungen, Heizungsart, Merkmalsausprägung Fernheizung (Fernwärme) sowie Baualtersklasse im 100x100 Meter Raster für NRW*
- [IT NRW, 2018] Information und Technik NRW, *Bevölkerungsentwicklung / Wohnflächenentwicklung*, Abrufbar unter: www.it.nrw/statistik
- [IT NRW, 2020] Information und Technik NRW, *Haushalte und Familien – Strukturdaten*, Abrufbar unter: <https://www.it.nrw/statistik/gesellschaft-und-staat/haushalte-und-familien> (Abruf: 19.02.2021)
- [IWU, 2021] Institut für Wohnen und Umwelt GmbH (IWU), *Energiebilanzen für Gebäude – Gradtagzahlen-Deutschland.xls*, Abrufbar unter:
www.iwu.de/publikationen/fachinformationen/energiebilanzen
- [KURZWEIL, 2013] Kurzweil, P., *Brennstoffzellentechnik. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen (2. Aufl.)*, 2013
- [LANDESREGIERUNG NRW, 2020] Landesregierung NRW (Hrsg.), *Entwurf eines Gesetzes zur Neufassung des Klimaschutzgesetzes NRW vom 21.12.2020 (Vorlage 17/4418)*, 2020
- [LANDTAG NRW, 2013] Landtag NRW, *Gesetz zur Förderung des Klimaschutzes in NRW*, 2013
- [LANUV, 2014] Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, *Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW Teil 3 – Biomasse-Energie*, 2014
- [LANUV, 2015A] Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, *Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW Teil 4 – Geothermie*, 2015
- [LANUV, 2018A] Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, *Klimaanalyse NRW*, 2018
- [LANUV, 2018B] Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, *Potenzialstudie Warmes Grubenwasser*, 2018
- [LANUV, 2019] Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, *Potenzialstudie Industrielle Abwärme*, 2019
- [LANUV & INWIS, 2020] Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW & InWIS Forschung & Beratung GmbH, *Bildung energetischer Quartiere für NRW*, 2020
- [LANUV, 2021] Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, *Fachinformationssystem Energieatlas NRW*, www.energieatlas.nrw.de

- [MWIDE, 2020] Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes NRW, *Wasserstoff Roadmap NRW, 2020*
- [PROGNOS ET AL., 2014] Prognos AG, EWI - Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln, Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH (GWS), Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose, 2014, Abrufbar unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/Migration/DE/Downloads/Publikationen/entwicklung-der-energiemaerkte-energiereferenzprognose-kurzfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (Abruf: 04.09.2020)
- [PROGNOS ET AL., 2019] Prognos AG, Fraunhofer IFAM, Öko-Institut e.V., BHKW-Consult, Stiftung UmwelteNERGIERECHT, *Evaluierung der Kraft-Wärme-Kopplung*, Auftrag vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2019
- [SCHAUMANN & SCHMITZ, 2010] Schaumann, G., Schmitz, K., *Kraft-Wärme-Kopplung*, 2010
- [STIFTUNG KLIMANEUTRALITÄT, 2021] Stiftung Denkfabrik Klimaneutralität, *Mehr Fläche für die Windenergie*, Abrufbar unter: <https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2021/01/2021-01-27-Mehr-Flaeche-fuer-die-Windenergie-Foliensatz-Stiftung-Klimaneutralitaet-1.pdf>, 2021
- [UBA, 2011] Umweltbundesamt, *Klimaschutz durch Reduzierung des Energiebedarfs für Gebäudekühlung*, 2011
- [UBA, 2017] Umweltbundesamt, *Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger – Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2016*, 2017
- [U.S. EIA, 2017] U.S. Energy Information Administration, *Distributed Generation and Combined Heat & Power System Characteristics and Costs in the Building Sector*, 2017
- [VCI, 2020] Verband der chemischen Industrie e.V., *Chemieunternehmen*, Abrufbar unter: <https://www.vci.de/der-vci/mitglieder/chemie-unternehmen/seiten.jsp> (Abruf: 03.03.2020)
- [WAGNER & UNGER, 2002] Wagner, H.-J., & Unger, H., *Validierung und kommunale Disaggregation des Expertensystems HERAKLES [Forschungsbericht]*, 2002
- [WUPPERTAL INSTITUT, 2021A] WISEE – Wuppertal Institute System Model Architecture for Energy and Emission Scenarios,
- [WUPPERTAL INSTITUT, 2021B] Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, KoVI SGW: *Kompetenzzentrum Virtuelles Institut – Strom zu Gas und Wärme | AP5: PtH im zukünftigen Energiesystem (im Druck)*, 2021
- [ZUKUNFTSHEIZEN, 2021] Institut für Wärme und Mobilität e.V. (IWO), *Zusammensetzung Heizölpreis*, Abrufbar unter: <https://www.zukunftsheizen.de/heizoel/zusammensetzung-heizoelpreis.html> (Abruf 23.02.2021)

Anhang 1: Energieträgeranteile nach Clusterkategorie für das Klimaneutral-Szenario (Allgemeine Versorgung)

[GWh]	Warmes Grubenwasser	Abfall	Klärgas	Ind. Abwärme	Solarthermie	Wasserstoff	Wärmepumpe	Biomasse	Kohle	Erdgas	Spitzenlastkessel	Summe	Anteil KWK
2030													
Bestand + Erweiterung	362	1.912	294	1.743	496	12	130	1.337	1.259	9.066	517	17.128	75%
Sonstige	0	46	253	916	796	3	291	716	0	2.597	171	5.789	59%
ländlich	0	0	5	34	58	0	16	42	0	93	8	255	52%
Gewerbe	0	0	72	480	74	3	40	520	0	814	61	2.064	64%
öffentlich	0	8	10	57	11	3	15	111	0	193	13	421	74%
Summe	362	1.966	635	3.229	1.434	21	492	2.726	1.259	12.764	770	25.658	70%
2040													
Bestand + Erweiterung	668	1.765	349	1.909	739	5.985	1.527	1.587	0	1.401	535	16.465	66%
Sonstige	0	42	301	1.003	1.166	1.248	1.443	570	0	524	165	6.463	40%
ländlich	0	0	6	37	85	9	77	36	0	26	6	283	19%
Gewerbe	0	0	86	525	108	698	133	291	0	409	62	2.313	62%
öffentlich	0	7	12	63	16	56	122	119	0	55	11	461	53%
Summe	668	1.815	754	3.536	2.115	7.996	3.301	2.603	0	2.417	780	25.985	59%
2050													
Bestand + Erweiterung	793	2.096	435	2.983	1.053	2.936	1.688	1.906	0	0	508	14.397	51%
Sonstige	0	50	376	1.567	1.661	750	1.710	587	0	0	152	6.854	24%
ländlich	0	0	8	58	121	4	72	29	0	0	4	297	9%
Gewerbe	0	0	108	821	154	433	328	612	0	0	62	2.519	42%
öffentlich	0	9	15	98	23	19	168	135	0	0	9	476	36%
Summe	793	2.155	942	5.526	3.012	4.143	3.967	3.269	0	0	736	24.543	42%

Anhang 2: Energieträgeranteile nach Netztyp für das Klimaneutral-Szenario (Allgemeine Versorgung)

[GWh]	Warmes Grubenwasser	Abfall	Klärgas	Ind. Abwärme	Solarthermie	Wasserstoff	Wärmepumpe	Biomasse	Kohle	Erdgas	Spitzenlastkessel	Summe	Anteil KWK
2030													
Großstadtnetz	321	1.767	251	1.406	276	9	94	943	1.254	7.548	434	14.303	75%
Mittelstadtnetz	33	146	24	156	66	0	15	143	0	747	40	1.369	76%
Kleinstadt oder Inselnetz	8	0	12	163	108	3	11	226	5	563	34	1.133	66%
Neueres Bestandsnetz	0	0	8	11	41	0	9	19	0	172	8	268	72%
ländlicher Bestand	0	0	0	4	3	0	0	7	0	16	1	31	74%
Neubaugebiet	0	0	0	0	2	0	0	0	0	7	0	9	76%
Industrie	0	0	0	2	0	0	0	0	0	12	0	15	81%
Summe	362	1.912	294	1.743	496	12	130	1337	1.259	9.066	517	17.128	75%
2040													
Großstadtnetz	593	1.631	298	1.540	418	5.585	1.073	1.051	0	1.161	463	13.812	70%
Mittelstadtnetz	60	134	28	171	96	208	216	286	0	62	37	1.299	55%
Kleinstadt oder Inselnetz	14	0	13	179	159	120	204	199	0	141	27	1.055	38%
Neueres Bestandsnetz	0	0	9	12	60	73	23	38	0	27	7	248	55%
ländlicher Bestand	0	0	0	5	5	0	7	9	0	2	1	29	25%
Neubaugebiet	0	0	0	0	2	0	3	2	0	1	0	9	8%
Industrie	0	0	0	3	0	0	1	0	0	9	0	14	66%
Summe	668	1.765	349	1.909	739	5.985	1.527	1.587	0	1.401	535	16.465	66%
2050													
Großstadtnetz	705	1.936	372	2.407	595	2.788	1.250	1.656	0	0	452	12.161	56%
Mittelstadtnetz	71	160	35	268	137	79	204	129	0	0	31	1.114	36%
Kleinstadt oder Inselnetz	17	0	16	279	226	39	198	84	0	0	19	877	12%
Neueres Bestandsnetz	0	0	12	18	85	30	25	29	0	0	6	205	34%
ländlicher Bestand	0	0	0	7	7	0	6	2	0	0	0	23	4%
Neubaugebiet	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	0	7	6%
Industrie	0	0	0	4	0	0	1	6	0	0	0	11	18%
Summe	793	2.096	435	2.983	1.053	2.936	1.688	1.906	0	0	508	14.397	51%

Landesamt für Natur, Umwelt und
Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Leibnizstraße 10
45659 Recklinghausen
Telefon 02361 305-0
poststelle@lanuv.nrw.de

www.lanuv.nrw.de