



KWK-Inno.Net Krefeld KWK-Modellkommune

Arbeitspaket 3.1

Potentialanalyse und Quartiersauswahl für den KWK-Ausbau
in elf Kommunen Nordrhein-Westfalens

Gesamtbericht

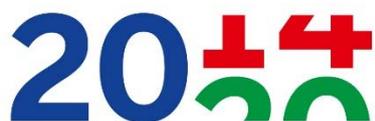
J. Bruchmann, F. Alsmeyer

Das Projekt wird gefördert von der Europäischen Union im Rahmen des Förderprogramms „Investition in Wachstum und Beschäftigung“.

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt,
Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung



EFRE.NRW
Investitionen in Wachstum
und Beschäftigung

Abschlussbericht zum Förderprojekt KWK-Inno.Net Krefeld, KWK-Inno.Net Krefeld,
KWK-Modellkommune, Arbeitspaket 3.1
Krefeld, Dezember 2019

Förderprojekt	KWK-Modellkommune, Phase 3 Umsetzungsphase KWK-Inno.Net Krefeld
Fördernummer	64.65-69 Kraft-Wärme-Kopplung 1053 B
Projektleitung	SWK E ² - Institut für Energietechnik und Energiemanagement Hochschule Niederrhein Prof. Dr.-Ing. Frank Alsmeyer ¹
Projektbearbeitung	Dipl.-Ing. Janine Bruchmann Charlotte Newiadomsky, M.Sc. Marco Hurtado Martinez, B. Eng.

¹ Korrespondenzautor. E-Mail: frank.alsmeyer@hs-niederrhein.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VI
1. Einleitung	8
2. Grundlagen der Kraft-Wärme-Kopplung	10
2.1. Kraft-Wärme-Kopplung	10
2.2. Virtuelle Kraftwerke	14
3. Methoden zur Ermittlung des KWK-Ausbaupotentials und zur Auswahl geeigneter Quartiere	15
3.1. Datengrundlage	16
3.1.1. Gründe für unterschiedliche Datenbestände aus dem Zensus 2011	16
3.1.2. Datenbasis zur Ermittlung des KWK-Potentials	18
3.2. Wärmebedarf von Wohngebäuden	19
3.2.1. Gebäudehülle und Anzahl der Bewohner	19
3.2.2. Wohnflächen pro Wohneinheit und mittlere Zahl der Wohnungen im Gebäude	21
3.2.3. Details zur Schätzung der mittleren Flächen pro Wohneinheit und der mittleren Anzahl an Wohneinheiten	24
3.3. Methode A: Merkmalsverknüpfung in der Zensusdatenbank	26
3.4. Methode B: Ermittlung über statistische Anteile	27
3.4.1. Anzahl der Wohngebäude mit KWK-Ausbaupotential	27
3.4.2. Berechnung des Heizwärmebedarfs pro Quartier (Stadtteil)	28
3.4.3. Spezifisches Ausbaupotential pro Gebietsfläche oder Gebäude	29
3.5. Berücksichtigung bestehender Fernwärmenetze: Methode A	30

3.5.1.	Großstädte (>100.000 Einwohner).....	31
3.5.2.	Kleine Städte (<100.000 Einwohner)	31
3.6.	Berücksichtigung bestehender Fernwärmenetze: Methode B	33
3.7.	Vorgehen bei Datenmangel bezüglich Verteilung des Gebäudebestands... ..	33
4.	Auswahl der Kommunen	36
4.1.	Typisierung von Kommunen.....	36
4.1.1.	Stadt- und Gemeindetypen	36
4.1.2.	Raumtypen.....	38
4.1.3.	Siedlungsstrukturelle Kreistypen.....	39
4.2.	Ausgewählte Kommunen.....	40
4.2.1.	Düsseldorf.....	41
4.2.2.	Köln.....	42
4.2.3.	Mönchengladbach.....	43
4.2.4.	Arnsberg	44
4.2.5.	Troisdorf.....	44
4.2.6.	Lüdenscheid.....	45
4.2.7.	Kolpingstadt Kerpen.....	45
4.2.8.	Grevenbroich	46
4.2.9.	Kleve	46
4.2.10.	Herdecke	46
4.2.11.	Marsberg	47
4.3.	Analyse der Basisdaten: Strukturen der Städte.....	47
5.	Ergebnisse	50
5.1.	Potential für dezentrale KWK	50
5.1.1.	Anzahl der Gebäude mit Potential <i>nKWK</i>	53

5.1.2.	Heizenergiebedarf mit Potential <i>QKWK, dez</i>	54
5.1.3.	Heizenergiebedarf pro Gebäude mit Potential <i>QKWK, dez, n_KWK</i>	54
5.2.	Analyse von Stadtteilen und -bezirken am Beispiel Köln.....	56
5.3.	Potentialkennlinien	58
6.	Zusammenfassung	62
7.	Handlungsempfehlungen.....	65
8.	Literaturverzeichnis	67

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Energiefließbild zur Strom- und Wärmeversorgung in Wohngebäuden mittels Kraft-Wärme-Kopplung.....	11
Abbildung 2: Energiefließbild der konventionellen Strom- und Wärmeversorgung in Wohngebäuden	12
Abbildung 3: Aufteilung der eingesetzten Energiemenge zur Strom- und Wärmeversorgung der KWK-Anlage und der konventionellen Strom- und Wärmeversorgung	13
Abbildung 4: Schematische Darstellung eines virtuellen Kraftwerks aus mehreren BHKW (SWK, 2015)	14
Abbildung 5: Spezifische Heizwärmebedarfe q von Wohngebäuden mit unterschiedlichen Baujahren (nach Kempe, 2014)	20
Abbildung 6: Luftbildausschnitt am Berliner Ring in Kerpen (Quelle: Google Maps, 2018)	34
Abbildung 7: Karte der Stadt- und Gemeindetypen in Nordrhein-Westfalen.....	38
Abbildung 8: Karte der Raumtypen nach dem Kriterium der Besiedlung von Nordrhein-Westfalen.....	39
Abbildung 9: Karte der strukturellen Kreistypen in Deutschland	40
Abbildung 10: Kennlinie K1.....	55
Abbildung 11: Kennlinie K2 - Zusammenhang Einwohnerdichte und flächenspezif. KWK-Potential $Q_{KWK,F}$	59
Abbildung 12: Kennlinien K3.1 - Zusammenhang des Heizenergiebedarfs pro Gebäude $Q_{KWK,n}$ zum Verhältnis n_{KWK} zu n ($p_{nKWK,n}$)	60
Abbildung 13: Kennlinie K3.2.....	61

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einteilung der teilnehmenden Kommunen nach Größe und Siedlungsstrukturtyp	9
Tabelle 2: Näherungsweise ermittelte mittlere Wohnflächen der unterschiedlichen Klassen der Wohneinheiten für größere Städte	23
Tabelle 3: Abhängigkeit der mittleren Wohnungsflächen in Gebäuden mit mind. 7 bzw. mind. 13 Wohneinheiten vom Baualter	25
Tabelle 4: Abhängigkeit der Zahl der Wohnungen in Gebäuden mit mind. 7 bzw. mind. 13 Wohneinheiten vom Baualter	25
Tabelle 5: Übersicht Basisdaten	48
Tabelle 6: Übersicht KWK-Potentiale	51
Tabelle 7: Übersicht Stadtbezirke Köln, sortiert nach KWK-Anzahlpotential <i>nKWK</i> . 56	
Tabelle 8: Übersicht Stadtteile im Bezirk Köln-Rodenkirchen, sortiert nach KWK-Anzahlpotential <i>nKWK</i>	57

Vorbemerkung

Die in diesem Bericht verwendeten weiblichen Formen von Personenbezeichnungen beziehen die der Gruppe zugehörigen männlichen Personen grundsätzlich mit ein.

Das Kompetenzzentrum SWK-Energiezentrum E² der Hochschule Niederrhein hat sich im Mai 2017 zum SWK E² – Institut für Energietechnik und Energiemanagement weiterentwickelt. In der Zusammenarbeit mit unseren Projektpartnern ändert sich nichts.

1. Einleitung

Das im Jahr 2017 novellierte Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz unterstreicht die Bedeutung der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) im Rahmen der Energiewende und bei der Umsetzung der politischen Energie- und Klimaziele. Die Technologie könnte auch langfristig einen festen Platz im Energiesystem haben, da auch regenerativ erzeugte Brennstoffe eingesetzt werden können. Die Studie „Potenzialerhebung von Kraft-Wärme-Kopplung in NRW“ belegt, dass gerade Nordrhein-Westfalen (NRW) mit seinen vielfältigen Ballungsräumen im Bereich KWK über enorme Ausbaupotentiale verfügt (Eikmeier, et al., 2011). Um diese Potentiale zu nutzen, hat das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen im Oktober 2012 die Kommunen aufgerufen, den KWK-Ausbau vor Ort zu fördern. Die Stadt Krefeld ist diesem Aufruf gefolgt und hat gemeinsam mit den Stadtwerken Krefeld (SWK AG) und dem SWK E² - Institut für Energietechnik und Energiemanagement (ehemals: SWK-Energiezentrum E² der Hochschule Niederrhein, SWK E²) das Forschungsprojekt *KWK-Inno.Net Krefeld* initiiert.

Ziel des Projektes war die Umsetzung eines virtuellen Kraftwerks aus wirtschaftlich orientiert betriebenen Mini-Blockheizkraftwerken in Krefeld und die Übertragung des Konzeptes auf weitere Kommunen in NRW. Die Aufgaben des Instituts für Energietechnik und Energiemanagement waren die Unterstützung kommunaler Entscheidungsträger bei der Identifizierung ihres KWK-Ausbaupotentials und die ökologische und ökonomische Bewertung der geplanten Maßnahmen sowie möglicher ergänzender Technologien aus Sicht der Kunden. Aus den Erkenntnissen bei der Zusammenarbeit mit verschiedenen Kommunen zur Identifizierung ihres KWK-Ausbaupotentials wird im vorliegenden Bericht die Übertragbarkeit des Konzeptes abgeleitet. Um die Übertragbarkeit des Konzeptes auf möglichst viele Kommunen in NRW ermöglichen zu können, wird das KWK-Ausbaupotential für insgesamt elf Kommunen unterschiedlicher Größe ermittelt (Tabelle 1).

In diesem Bericht werden die Ergebnisse der einzelnen Kommunen zusammengefasst und miteinander unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Gebiets- und Siedlungsstrukturen sowie der unterschiedlichen Datenlage verglichen. Zusätzlich wird die Übertragbarkeit der Methode zur Quartiersauswahl sowie die unterschiedliche

Datenlage in den Kommunen und die Auswirkungen auf die Potentialermittlung mit zwei verschiedenen Methoden diskutiert.

Tabelle 1: Einteilung der teilnehmenden Kommunen nach Größe und Siedlungsstrukturtyp

Kommune	Bevölkerung	Fläche	Einwohner- dichte	Größen- einteilung	Siedlungs- strukturelle Typologie
	[EW]	[km ²]	[EW/km ²]		
Köln	1.069.192	405	2.554	Großstadt	Städtische Region
	Quelle EW: http://www.stadt-koeln.de/mediaasset/content/pdf15/statistik-standardinformationen/koelner_zahlenspiegel_2016.pdf Seite 1, Stand: 2015, abgerufen: Mai 2017				
Düsseldorf	603.210	217	2.752	Großstadt	Städtische Region
	Quelle der EW: Düsseldorf; 2015				
Mönchengladbach	266.586	170	1.501	kleine Großstadt	Städtische Region
	Quelle EW: https://www.moenchengladbach.de/de/aktuell-aktiv/newsroom/basisinformationen/ , Stand: 2015, abgerufen: Mai 2017				
Arnsberg	78.562	194	405	große Mittelstadt	Städtische Region
	Quelle EW: https://www.arnsberg.de/informationen/EWO_Entwicklung_2000_bis_2016_HWI_NWI_nach_Stadtteilen.pdf , Stand: 2016, abgerufen: Mai 2017				
Troisdorf	77.753	62	1.236	große Mittelstadt	Städtische Region
	Quelle EW: http://www.troisdorf.de/web/de/stadt_rathaus/Stadtportrait/statistik.htm , Stand: 2016, abgerufen: Mai 2017				
Lüdenscheid	75.144	87	838	große Mittelstadt	Städtische Region
	Quelle EW: http://www.luedenscheid.de/luedenscheid_erleben/stadtinfos/kurz_und_knapp/117120100000012401.php , Stand: 2017, abgerufen: Mai 2017				
Kerpen	67.659	114	575	große Mittelstadt	Städtische Region
	Quelle EW: https://www.stadt-kerpen.de/index.phtml?La=1&sNavID=1708.34&mNavID=166.7&object=tx,1708.854.1&sub=0 , Stand: 2016, abgerufen: Mai 2017				
Grevenbroich	66.832	103	632	große Mittelstadt	Städtische Region
	Quelle EW: https://www.grevenbroich.de/stadtportrait/daten-zahlen/ , Stand: 2016, abgerufen: Mai 2017				
Kleve	52.037	98	489	kleine Mittelstadt	Städtische Region
	Quelle EW: https://www.kleve.de/de/inhalt/kleve-in-kuerze/ , Stand: 2015, abgerufen: Mai 2017				
Herdecke	24.428	22	1.041	kleine Mittelstadt	Städtische Region
	Quelle EW: http://www.herdecke.de/wirtschaft-stadtplanung/wirtschaftsfoerderung/standort-herdecke.html , Stand: 2010, abgerufen: Mai 2017				
Marsberg	ca. 20.000	182	109	Kleinstadt	Region mit Verdichtungs- ansätzen
	Quelle EW: http://www.marsberg.de/ , Stand: unbekannt, abgerufen: Mai 2017				

2. Grundlagen der Kraft-Wärme-Kopplung

Im Konzept der KWK-Modellkommune Krefeld *KWK-Inno.Net Krefeld* werden von der SWK AG dezentrale Kraft-Wärme-Kopplungssysteme mit dem neuen Konzept der „wirtschaftlich orientierten Betriebsführung“ ausgelegt, in die Versorgungsstruktur verschiedener Gebäude in Krefeld integriert und in einem virtuellen Kraftwerk gemeinsam betrieben. Hiermit kann das KWK-Potential auch in den Bezirken erschlossen werden, in denen sich der Ausbau eines Fernwärmenetzes wirtschaftlich nicht lohnt.

2.1. Kraft-Wärme-Kopplung

Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) bezeichnet ein Energieversorgungssystem, welches sowohl Strom² als auch Wärme³ bereitstellt. Dadurch können der Bedarf an Brennstoff und die Emission an CO₂ im Vergleich zur konventionellen Energieversorgung verringert werden. Zu den KWK-Anlagen zählen Verbrennungs- und Stirling-Motoren, Gas- und Dampfturbinen sowie Brennstoffzellen. Eingesetzt werden diese sowohl zentral als auch dezentral. Beispiele für zentrale KWK-Anlagen sind

- Gas- und Dampfkraftwerke,
- dampfauskoppelnde Kohlekraftwerke und
- Müllverbrennungsanlagen,

deren Wärme in Fernwärmenetzen zu den Endverbraucherinnen transportiert wird. Dezentrale KWK-Anlagen (auch Objekt-KWK genannt) stehen ortsnahe zur Endverbraucherin, wie z.B. Mini- oder Mikro-Blockheizkraftwerke (BHKW) und Brennstoffzellen und versorgen einzelne Gebäude, kleine Wohnsiedlungen oder zusammenhängende Gebäudekomplexe.

Der Vorteil der KWK zeigt sich z.B. im Vergleich der Strom- und Wärmeversorgung eines Wohngebäudes mit einem konventionellen System (i.d.R. Netzanschluss zur Stromversorgung und Brennstoffkessel zur Wärmeversorgung).

² In diesem Bericht wird für den fachlich korrekten Begriff „elektrische Energie“, zum besseren Verständnis das allgemein gebräuchliche Synonym „Strom“ verwendet.

³ In diesem Bericht wird für den fachlich korrekten Begriff „thermische Energie“ in einem Prozess zur Temperaturerhöhung das allgemein gebräuchliche Synonym „Wärme“ verwendet.

Abbildung 1 zeigt den Energiefluss der Strom- und Wärmeversorgung von Wohngebäuden mittels KWK. Das BHKW hat in diesem Beispiel einen Gesamtwirkungsgrad von 87% bezogen auf den Heizwert⁴ des Erdgases. Wird die Menge Erdgas im BHKW eingesetzt, die einem Heizwert von 100 kWh entspricht, kann der Verbraucher mit 51 kWh Wärme und 36 kWh Strom versorgt werden. Mit dem Primärenergiefaktor für Erdgas von 1,1 werden für diese Versorgung 110 kWh Primärenergie eingesetzt. Durch den Primärenergiefaktor wird die Energie, die zur Förderung, Aufbereitung und Verteilung des Erdgases benötigt wird, berücksichtigt.

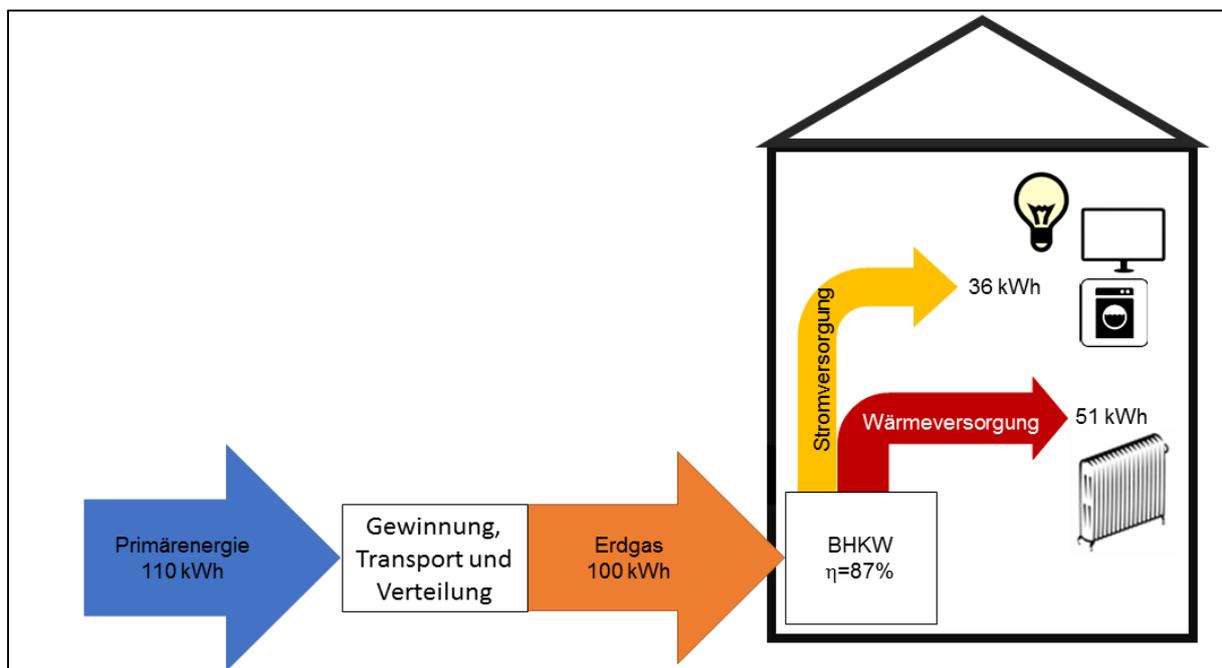


Abbildung 1: Energiefließbild zur Strom- und Wärmeversorgung in Wohngebäuden mittels Kraft-Wärme-Kopplung

Abbildung 2 zeigt den Energiefluss der konventionellen Strom- und Wärmeversorgung von Wohngebäuden. Um die gleiche Menge Strom und Wärme zur Versorgung des Verbrauchs wie im vorherigen Beispiel bereitzustellen, werden zwei getrennte Systeme verwendet. Für die Wärmeversorgung mit 51 kWh wird, z.B. in einem

⁴ „Der Heizwert (früher auch unterer Heizwert genannt) ist die auf die Brennstoffmenge bezogene Energie, die bei vollständiger Verbrennung bei konstanten Druck frei wird, wenn die Verbrennungsprodukte auf die Bezugstemperatur zurückgeführt werden, der Wasserdampf jedoch dampfförmig gedacht bleibt. Als Bezugsgröße ist nach internationalen Empfehlungen 25°C vereinbart.“ (Cerbe & Hoffmann, 1990)

Brennwertkessel⁵ mit einem Wirkungsgrad von 99% (bezogen auf den Heizwert), die Menge Erdgas eingesetzt, die einem Heizwert von 52 kWh und somit einem Primärenergieeinsatz von 57 kWh entspricht. Für die Stromversorgung mit 36 kWh durch den deutschen Kraftwerkspark mit einem Wirkungsgrad von 45% im Jahr 2014 (BDEW; AG Energiebilanzen e.V., 2016) werden weitere 80 kWh Primärenergie benötigt.

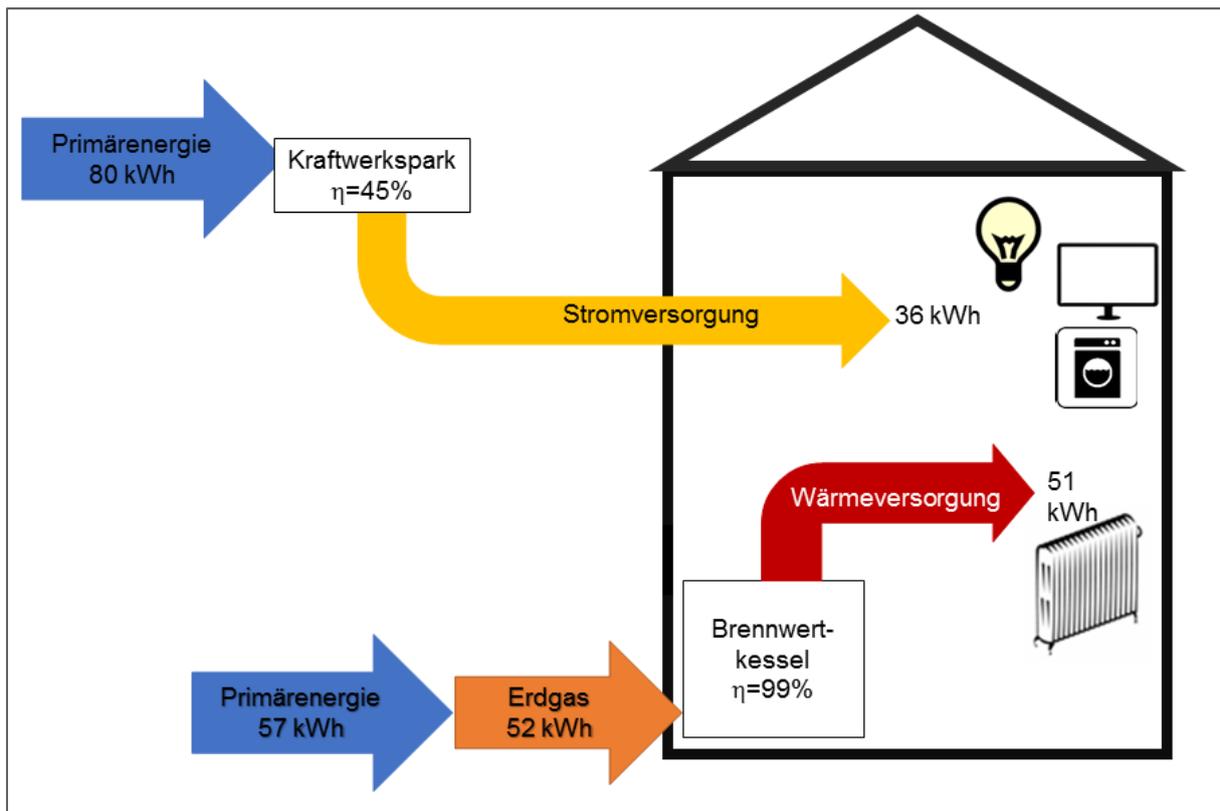


Abbildung 2: Energiefließbild der konventionellen Strom- und Wärmeversorgung in Wohngebäuden

Es wird deutlich, dass bei der konventionellen Strom- und Wärmeversorgung im Vergleich zur Versorgung mittels KWK-Anlagen ein höherer Primärenergieeinsatz notwendig ist, um die gleichen Mengen an Nutzenergie bereitzustellen (Abbildung 3). Allerdings zeigt sich auch, dass die Energieeinsparung durch den Einsatz von KWK-

⁵ „Der Brennwert (früher oberer Heizwert genannt) ist die auf die Brennstoffmenge bezogene Energie, die bei vollständiger Verbrennung bei konstantem Druck frei wird, wenn die Verbrennungsprodukte auf die Bezugstemperatur zurückgekühlt werden. Bei der Bestimmung des Brennwertes kondensiert der vom Brennstoff verursachte Wasserdampf und gibt seine Kondensationsenthalpie ab.“ (Cerbe & Hoffmann, 1990)

Anlagen nur erzielt wird, wenn beide Energieformen – Strom und Wärme – gleichzeitig genutzt werden. Durch die zeitliche Entkopplung des lokalen Wärme- und Strombedarfs z.B. über Energiespeicher könnte die Einsparung auch genutzt werden, obwohl die Bedarfe zu unterschiedlichen Zeiten vorliegen. Dabei sind aber weitere Investitionen und die Energieverluste durch die Speichertechnologie zu berücksichtigen. Ohne Energiespeicher muss der Strom in Zeiten, in denen zwar ein Wärmebedarf aber kein ausreichend hoher Strombedarf vorliegt, ins Verteilnetz eingespeist werden. Da der verstärkte Ausbau von Wind- und Photovoltaikanlagen zu fluktuierenden Netzauslastungen und damit verbundenen Strompreisschwankungen am Energiemarkt führt, stellt die ungesteuerte Einspeisung von Strom durch dezentrale Energieanlagen die Verteilnetzbetreiber vor Herausforderungen. Mit zentralen KWK-Anlagen, die die Wärme in ein Fernwärmenetz und den Strom ins Stromnetz einspeisen, wird die Bedingung der gleichzeitigen Nutzung von Strom und Wärme durch einen (oder einige wenige) Verbraucher aufgelöst. Das gleiche trifft auch auf virtuelle Kraftwerke aus dezentralen KWK-Anlagen zu, auf die im nächsten Abschnitt näher eingegangen wird.

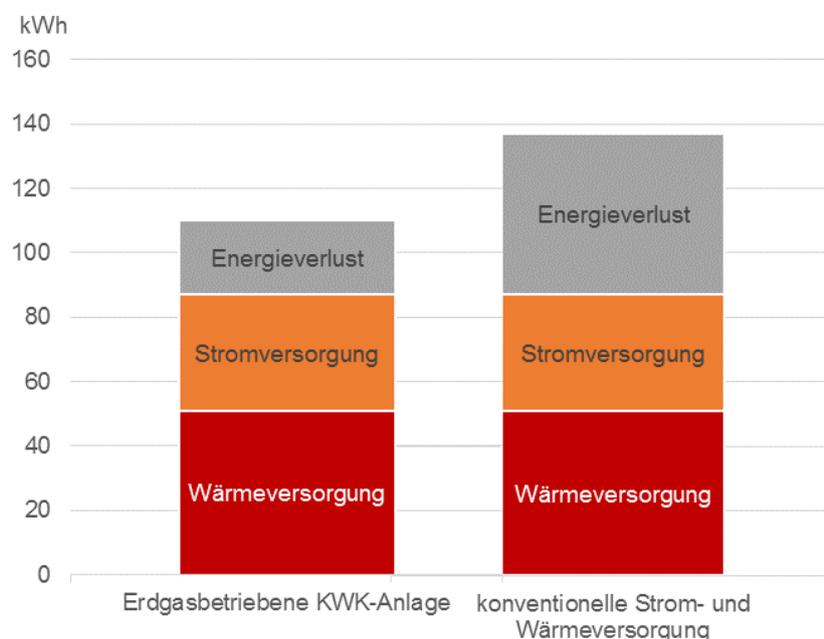


Abbildung 3: Aufteilung der eingesetzten Energiemenge zur Strom- und Wärmeversorgung der KWK-Anlage und der konventionellen Strom- und Wärmeversorgung

2.2. Virtuelle Kraftwerke

In virtuellen Kraftwerken werden mehrere einzelne dezentrale Energieanlagen über Mess-, Steuer- und Regeltechnik verbunden. Durch diese Verschaltung funktioniert das virtuelle Kraftwerk wie eine Einheit, mit einer zentralen Steuerung für die einzelnen Anlagen. Abbildung 4 zeigt die schematische Darstellung eines virtuellen Kraftwerks aus mehreren BHKW. In diesem Fall wird die verfügbare Wärme lokal – also in dem Gebäude, in dem das BHKW steht – genutzt oder gespeichert und der Strom kann sowohl lokal genutzt als auch ins Netz eingespeist werden. Der Betreiber des virtuellen Kraftwerks kann unter Berücksichtigung der Strompreise am Energiemarkt, der lokalen Netzauslastung und des lokalen Wärmebedarfs im Gebäude die Betriebsweise der einzelnen Anlagen steuern. Dadurch ist die gleichzeitige, lokale Nutzung von Strom und Wärme nicht mehr zwingend erforderlich. Zusätzlich kann der Betreiber auf die Strompreisentwicklung am Energiemarkt reagieren und die lokale Netzauslastung optimieren.

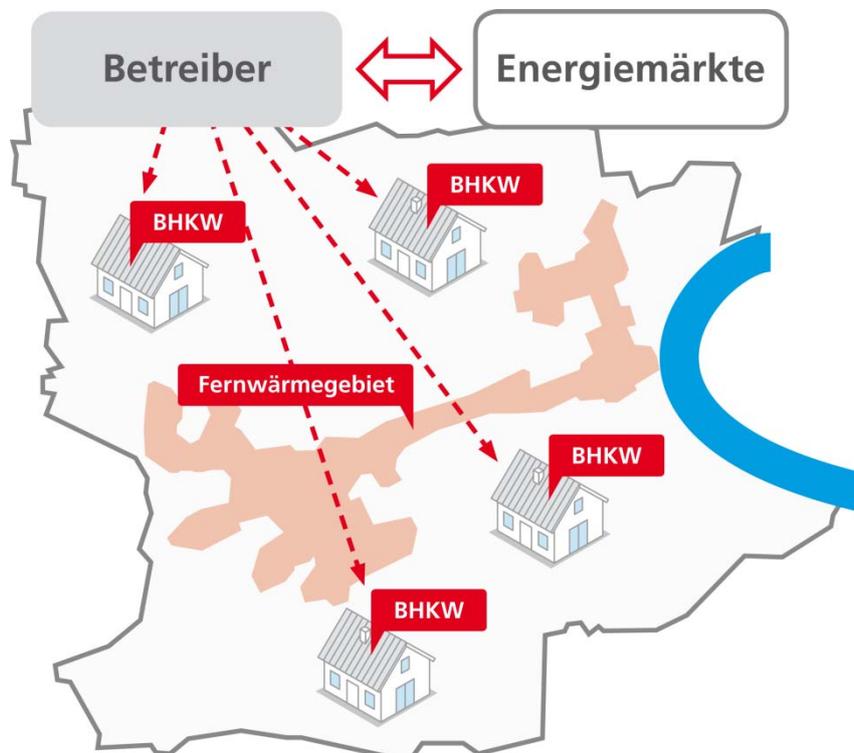


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines virtuellen Kraftwerks aus mehreren BHKW (SWK, 2015)

3. Methoden zur Ermittlung des KWK-Ausbaupotentials und zur Auswahl geeigneter Quartiere

Für die Kommunen sind im Kontext des Projektes zwei Aspekte relevant:

- wie hoch ist das **Potential zum KWK-Ausbau** und
- wo befinden sich **geeignete Quartiere**?

Letztere Frage stand in der Feinkonzeptphase des Projektes im Fokus; in diesem Bericht hat sich aufgrund der unbefriedigenden Datenlage in vielen Kommunen der Schwerpunkt mehr auf die KWK-Potentialermittlung für die Gesamtstadt verschoben.

Mit der Quartiersauswahl werden die Quartiere identifiziert, in denen sich ein KWK-Ausbau besonders stark auf die Energie- und CO₂-Bilanz der Kommune auswirkt. Mit Kenntnis dieser Quartiere können sich z.B. quartiersbezogene, energetische Stadtentwicklungskonzepte mit dem KWK-Ausbau befassen.

Dazu wird das Stadtgebiet in Quartiere unterteilt, deren KWK-Ausbaupotentiale miteinander verglichen werden. Je größer das ermittelte Potential eines Quartiers ist, desto größer sind auch seine Auswirkungen auf die Energie- und CO₂-Bilanz, da der Energiebedarf ein Kennwert des Ausbaupotentials ist. Als Quartiere werden in dieser Arbeit zusammenhängende Siedlungsstrukturen innerhalb einer Kommune verstanden. Dabei kann es sich um reine Wohngebiete, Innenstadtgebiete oder Industriegebiete handeln.

Das KWK-Ausbaupotential hängt von zwei Größen ab; zum einen vom jährlichen Heizwärmebedarf und zum anderen vom Energiebedarf zur Warmwasserversorgung. Ist das KWK-Ausbaupotential eines Quartiers hoch, bedeutet das allerdings nicht, dass alle Wohngebäude innerhalb des Quartiers für eine Energieversorgung durch eine KWK-Anlage geeignet sind. Ebenso wenig bedeutet ein niedriges KWK-Ausbaupotential eines Quartiers, dass die Energieversorgung durch eine KWK-Anlage innerhalb des Quartiers grundsätzlich auszuschließen ist.

Das KWK-Ausbaupotential eines Quartiers wird mit mehreren Kennzahlen charakterisiert, deren Berechnung nachfolgend erläutert wird. Diese sind

- die Anzahl der Wohngebäude mit KWK-Ausbaupotential,

- der jährliche Heizwärmebedarf der Gebäude (Abschnitt 3.2) und
- spezifische Kennzahlen pro Fläche oder Gebäude.

Im Verlauf des Projektes wurden zwei Varianten der Potentialermittlung entwickelt, nachfolgend Methode A und B genannt. Gemeinsam ist ihnen, dass Gebäude mit relativ hohem Wärmebedarf gesucht werden; im Kern sind das größere und ältere Gebäude. Die Methoden unterscheiden sich im Vorgehen dahingehend, dass bei Berechnungsmethode A (Abschnitt 3.3) auf Basis der Zensusdaten die statistischen Merkmale „Zahl der Wohnungen im Gebäude“ und „Wohnfläche“ verknüpft werden. Zudem werden die statistischen Merkmale „Baujahr (Mikrozensus-Klassen)“ und „Zahl der Wohnungen im Gebäude“ verknüpft. Methode B stützt sich hingegen auf statistische Anteile relevanter (großer; alter) Gebäude ohne direkte Merkmalsverknüpfung und weist daher größere Unsicherheiten auf.

Für eine nach Stadtteilen aufgeschlüsselte Betrachtung ist die Berechnungsmethode A nicht anwendbar. Die vorliegenden Stadtteildaten enthalten auch die Merkmale „Anzahl der Wohnungen“ und „Wohnfläche“, allerdings sind diese nicht verknüpfbar und werden deshalb nach Methode B mit Anteilen verrechnet (Abschnitt 3.4).

In den elf Einzelberichten zu den Kommunen sind nur Ergebnisse nach Methode B dargestellt. Die Systematik nach Methode A wurde im Projektverlauf erst später entwickelt. Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse gegenübergestellt.

3.1. Datengrundlage

Die Datenlage in den betrachteten Kommunen variiert erheblich. Die Hintergründe werden in Abschnitt 3.1.1 diskutiert. In der Mehrzahl der untersuchten Fälle ist eine Quartiersauswahl auf Basis dieser Daten gar nicht möglich, weil die relevanten Zahlen nur summarisch für die Gesamtstadt vorliegen. Immerhin kann auch in diesen Fällen ein Gesamtpotential für den dezentralen KWK-Ausbau abgeschätzt werden. In Abschnitt 3.1.2 wird die Struktur der Datenbasis erläutert.

3.1.1. Gründe für unterschiedliche Datenbestände aus dem Zensus 2011

Für Potentialschätzungen zum KWK-Ausbau und eine entsprechende Quartiersauswahl werden verschiedene Angaben zum Gebäudebestand benötigt (siehe auch Abschnitt 3.2). Da es in Deutschland keine flächendeckenden Register

über Gebäude und Wohnungen gibt, wurden im Rahmen des letzten Zensus 2011 Daten zu Gebäuden und Wohnungen mittels Befragung erhoben. Die Befragung erfolgte nicht als Stichprobe, sondern als Vollerhebung. Eigentümerinnen bzw. Verwaltungen der Gebäude und Wohnungen wurden schriftlich befragt. Aggregierte Zahlen hierzu sind online verfügbar (Statistisches Bundesamt, 2014) und dienten in diesem Projekt als Basis.

Mit dem Zensus 2011 wurden zwar Einzelangaben zum Gebäude- und Wohnungsbestand erhoben, diese standen aber nur Kommunen mit räumlich, organisatorisch und personell von anderen Verwaltungsstellen abgeschotteten Statistikstellen für einen begrenzten Zeitraum zur Verfügung (Information und Technik NRW, 2009). Da dies auf die Mehrheit der Kommunen in NRW nicht zutrifft, waren sie auf die Datenaufbereitungen und Auswertungen des Amtes für Information und Technik Nordrhein-Westfalen (IT.NRW) angewiesen. Dazu war es nötig, dass die Städte und Gemeinden für ihr Gebiet die kleinräumige Zuordnung der Adressen erstellen und bis spätestens Ende 2010 an IT.NRW übermitteln (Städte- und Gemeindebund NRW, 2009). Da die Auswahl der an diesem Projekt teilnehmenden Kommunen erst im Jahr 2016 abgeschlossen war, konnten bis zu dem Zeitpunkt noch nicht angeforderte Datensätze auch nicht mehr nachträglich angefordert werden.

Die Datenlage der Kommunen variiert nun zusammengefasst aus zwei Gründen:

- aufgrund datenschutzrechtlicher Bestimmungen ergeben sich abhängig von den Gebäudezahlen bei kleineren Kommunen Einschränkungen bei der Merkmalsverknüpfung der online verfügbaren Gebäudestatistiken – dies betrifft alle Kommunen bis auf die Großstädte Köln, Düsseldorf, Mönchengladbach und Krefeld;
- kleinräumigere Aufschlüsselungen des Gebäudebestandes, z.B. nach Stadtteilen, mussten wie oben beschrieben in einem begrenzten Zeitraum explizit durchgeführt oder angefordert werden. Diese Daten waren nur für die Städte Köln, Düsseldorf und Lüdenscheid verfügbar. Damit ist auch nur für diese drei Kommunen eine Quartiersauswahl möglich.

3.1.2. Datenbasis zur Ermittlung des KWK-Potentials

In der Zensusdatenbank des Zensus 2011 (Statistisches Bundesamt, 2014) sind für dieses Projekt die beiden statistischen Einheiten „Gebäude“ und „Wohnung“ relevant. Hierbei sind für alle Kommunen insbesondere die folgenden statistischen Merkmale verfügbar:

- die Wohnfläche in Intervallen von 10 oder 20 m²;
- der Anzahl an Wohneinheiten WE (in der Einteilung 1, 2, 3-6, 7-12 und >12 Wohneinheiten pro Gebäude) und
- das Baujahr, das in Intervallen *i* angegeben ist. Üblich sind Jahrzehnte, Jahrzwanzigste und die Zensusaltersklassen des Zensus 2011, darunter
 - vor 1919,
 - 1919-1948,
 - 1949-1978,
 - 1979-1986 sowie
 - kürzere Intervalle späterer Jahre, die für die Betrachtung in dieser Studie nicht relevant sind.

In dieser Studie wurden überwiegend die Zensusaltersklassen verwendet, da hier in der Datenbank die meisten Kombinationen mit den anderen Merkmalen verfügbar sind. Leider korrespondieren diese nicht zwingend mit den Jahren, in denen regulatorische Änderungen (z.B. Wärmeschutzverordnung, Energieeinsparverordnung – EnEV) in Kraft getreten sind.

Die Merkmale „Anzahl an Wohneinheiten“ und „Baualter“ lassen sich für alle Kommunen kombinieren, sodass man z.B. die Anzahl der vor 1919 gebauten Gebäude mit 7-12 Wohneinheiten erhalten kann. In der ursprünglichen Methode B, die in der Feinkonzeptphase entwickelt wurde, wurde diese Merkmalskombination allerdings nicht angewandt, sondern mit Anteilen der Einzelmerkmale an der Gesamtzahl der Gebäude gearbeitet. Verglichen mit der direkten Verknüpfung der Merkmale „Baujahr (Mikrozensus-Klassen)“ und „Zahl der Wohnungen im Gebäude“ stellt dies eine Näherung dar, die besonders bei kleinen statistischen Einheiten wie Stadtteilen zu größeren Abweichungen führen kann.

Die Verknüpfung aller drei oben gelisteten Merkmale ist nur für Großstädte möglich, weshalb für kleine Städte repräsentative Wohnflächen nicht direkt ermittelt werden können. Das gewählte Vorgehen wird später in Abschnitt 3.2.3 beschrieben.

Für Köln, Düsseldorf und Lüdenscheid waren diese Daten zur Gebäudestruktur auch nach Stadtteilen aufgeschlüsselt verfügbar. Diese Daten sind allerdings nicht über die Zensusdatenbank verfügbar, sondern mussten von der Kommune im Rahmen des Zensus 2011 explizit angefordert werden. Leider wurden dabei teilweise andere Klasseneinteilungen bezüglich Baujahr und Zahl der Wohnungen je Gebäude verwendet, sodass eine direkte Vergleichbarkeit nicht immer gegeben ist.

3.2. Wärmebedarf von Wohngebäuden

Der Wärmebedarf – also der Energiebedarf zur Heizwärme- und Warmwasserversorgung – eines Wohngebäudes hängt hauptsächlich von drei Eigenschaften des Gebäudes ab,

- den thermischen Eigenschaften der Gebäudehülle,
- der Anzahl der Bewohner und
- der Wohnfläche.

3.2.1. Gebäudehülle und Anzahl der Bewohner

Die thermischen Eigenschaften der Gebäudehülle werden von den verwendeten Baumaterialien definiert. Die Art und die Dicke des Materials der unterschiedlichen Gebäudebauteile wie z.B. Außenwände, Dach- und Bodenflächen, Fenster etc., beeinflussen den Wärmeverlust. Eine gute Fensterisolierung und Wärmedämmung der Gebäudehülle reduzieren den Wärmebedarf.

Da die thermischen Eigenschaften für jedes Gebäude unterschiedlich sind, können diese Werte bei einer quartiersbezogenen Potentialanalyse nicht für die einzelnen Gebäude ermittelt werden. Das Baujahr der Wohngebäude dient in dieser Phase der Potentialanalyse als Indikator für die thermischen Eigenschaften, da im Wohnungsbau verschiedene Baualtersklassen unterschieden werden können, die jeweils durch einheitliche Bauweisen (Auswahl der Materialien, Gestaltung der Gebäudehülle, Dimensionierung der Bauelemente) gekennzeichnet sind. Die Einteilung der Baualtersklassen orientiert sich dabei an den Zeitpunkten, zu denen für den

Wohnungsbau wichtige Rahmenrichtlinien wirksam wurden (Blesl, M. et al., 2008). Mit Hilfe der Baualtersklassen werden spezifische Wärmebedarfskennzahlen q definiert. Sie geben an, wieviel Energie pro Quadratmeter Wohnfläche A im Jahr für die Heizwärme benötigt wird, somit ist die Wohnfläche eine weitere Eigenschaft des Gebäudes zur Bestimmung des Heizwärmebedarfs $Q_{H,G}$ gemäß

$$Q_{H,G} = q \cdot A. \quad \text{Gl. 1}$$

Abbildung 5 zeigt den spezifischen Heizwärmebedarf von Wohngebäuden mit unterschiedlichen Baujahren (nach Kempe, S., 2014). Das Balkendiagramm zeigt die spezifischen Heizwärmebedarfe für Mehrfamilienhäuser mit mindestens 6 Wohneinheiten. Als Linien sind zum Vergleich die spezifischen Heizenergiebedarfe eines Niedrigenergiehauses und eines KfW-Effizienzhauses 40 eingefügt.

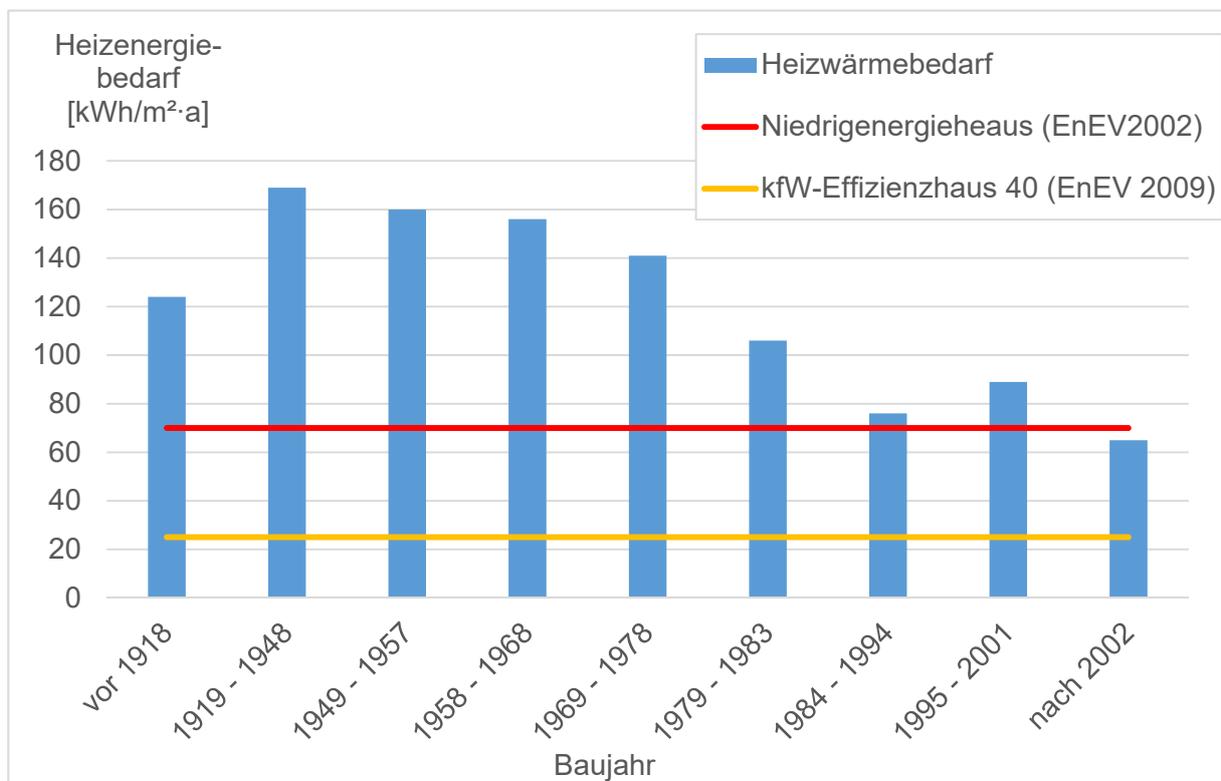


Abbildung 5: Spezifische Heizwärmebedarfe q von Wohngebäuden mit unterschiedlichen Baujahren (nach Kempe, 2014)

Damit die KWK-Anlage eine ausreichend hohe Jahreslaufzeit erzielen kann, werden die **Wohngebäude mit einem spezifischen Heizenergiebedarf über 100 kWh/(m²·a), also einem Baujahr vor 1983** (Abbildung 5) in der Potentialermittlung berücksichtigt. Für Wohngebäude mit einem niedrigeren Heizenergiebedarf bieten sich viele energieeffiziente und auch regenerative Wärmeversorgungstechnologien neben der KWK an. Welche dieser Technologien für das einzelne Gebäude am effizientesten ist, lässt sich nur mittels einer individuellen Betrachtung (z.B. nach DIN V 18599, 2011) bestimmen.

Der Energiebedarf eines Wohngebäudes zur Warmwasserversorgung ist in erster Linie abhängig von der Anzahl der Bewohnerinnen. In dieser Phase der Bedarfsermittlung erfolgt keine Einzelfallbetrachtung. Da die genaue Anzahl der Bewohnerinnen somit nicht bekannt ist, ist der Energiebedarf zur Warmwasserversorgung indirekt abhängig von der Anzahl an Wohneinheiten bzw. Haushalten im Gebäude, indem vom durchschnittlichen jährlichen Energiebedarf zur Warmwasserversorgung in deutschen Privathaushalten ausgegangen wird. Der Energiebedarf der privaten Haushalte in Deutschland im Jahr 2014 betrug 652 Mrd. kWh; 12 % des Energiebedarfs wurden zur Warmwasserversorgung verwendet (Bundesamt für Statistik, 2017a). Bei etwa 40.774.000 Haushalten in Deutschland im Jahr 2015 (Bundesamt für Statistik, 2017b) beträgt der durchschnittliche jährliche Energiebedarf zur Warmwasserversorgung ca. 1.900 kWh pro Haushalt. Daraus ergibt sich ein täglicher Energiebedarf zur Warmwasserversorgung von ca. 5 kWh pro Haushalt. Ein ausreichend hoher Warmwasserbedarf ermöglicht zusätzliche, effiziente Laufzeiten der KWK-Anlage in den Sommermonaten. Um einen ausreichend hohen Warmwasserbedarf in den Sommermonaten zu erzielen, werden daher nur **Wohngebäude mit mindestens 7 Wohneinheiten** in der Potentialermittlung berücksichtigt.

3.2.2. Wohnflächen pro Wohneinheit und mittlere Zahl der Wohnungen im Gebäude

Um aus den Anzahlen der relevanten Gebäude den jährlichen Heizwärmebedarf zu ermitteln, werden die jeweiligen Wohnflächen benötigt (vgl. Gl. 1). Diese sind aus den kommunalen Daten aber nicht direkt bekannt. Es existieren, u.a. aus Gründen des Datenschutzes, nur summarische Werte über die Anzahlen von Gebäuden und

Wohnungen, allerdings differenziert nach statistischen Merkmalen, wie im folgenden Abschnitt beschrieben.

Da Wohneinheiten in Mehrfamilienhäusern in der Regel kleiner sind als in Ein- oder Zweifamilienhäusern, deren mittlere Größen aber zunächst nicht bekannt sind, kann die für den KWK-Ausbau relevante Wohnfläche nicht über die gesamte Wohnfläche eines Stadtteils und die prozentualen Verteilungen nach Baujahr und Anzahl der Wohneinheiten berechnet werden, wie es in Gl. 13 für die Anzahl der relevanten Gebäude erfolgt. Stattdessen wird in dieser Studie zunächst für jede Größenklasse der Wohneinheiten WE eine eigene mittlere Wohnfläche $A_{m,WE}$ näherungsweise bestimmt (s. Abschnitt weiter unten, Schritt 1). Dann wird die mittlere Zahl der Wohneinheiten pro Gebäude einer Größenklasse, $n_{m,WE}$, berechnet (Schritt 2). Die Gesamtwohnfläche in einem Gebäude dieser Größenklasse ergibt sich zu

$$A_{m,WE,ges} = A_{m,WE} \cdot n_{m,WE} \cdot \quad \text{Gl. 2}$$

Schritt 1: Schätzung der mittleren Flächen $A_{m,WE}$ pro Wohneinheit nach Anzahl der Wohneinheiten im Gebäude

Die hierzu verfügbaren Daten variieren je nach Kommune. Für die großen Kommunen in diesem Projekt (Köln, Düsseldorf, Mönchengladbach, Krefeld) ist in der Zensusdatenbank 2011 (Statistisches Bundesamt, 2014) eine gleichzeitige Aufschlüsselung der Zahl der Wohnungen $n_{i,WE}$ nach Fläche A_i der Wohnung (10m²-Intervalle i), Zahl der Wohneinheiten im Gebäude und Baujahr möglich. Da die Ergebnisse wenig vom Baujahr abhängen (Abschnitt 3.2.3), wurde im Interesse einer besser nachvollziehbaren Darstellung auf eine Differenzierung nach Baujahr verzichtet. Das Ergebnis der Potentialermittlung wird dadurch wenig beeinflusst.

Für die Schätzung in Schritt 1 wird zunächst für jedes 10m²-Intervall i die mittlere Wohnfläche $A_{m,i}$ angenommen (für das Intervall 60-69m² also z.B. 65m²) und die Gesamtwohnfläche in Gebäuden mit dieser Anzahl von Wohnungen A_{WE} gemäß

$$A_{WE} = \sum_i n_{i,WE} A_{m,i} \quad \text{Gl. 3}$$

aufsummiert. Wegen der nicht plausibel bestimmbareren mittleren Flächen für das kleinste (<30m²) und größte in der Datenbank verfügbare Intervall (>179m²) werden

diese beiden Randintervalle dabei ausgenommen, was aber in allen betrachteten Fällen weniger als 6% des Bestands ausmacht und daher nur zu einem kleinen Fehler führt.

Die mittlere Wohnfläche $A_{m,WE}$ ergibt sich dann mit der Gesamtzahl der Wohnungen in dieser Gebäudeklasse $n_{WE} = \sum_i n_{Ai,WE}$ aus

$$A_{m,WE} = A_{WE} / n_{WE} . \quad \text{Gl. 4}$$

Für die genannten Städte resultieren hieraus die in Tabelle 2 aufgeführten mittleren Wohnungsgrößen. Erwartungsgemäß nehmen die Flächen pro Wohneinheit mit der Größe des Gebäudes jeweils ab und liegen in plausiblen Bereichen. Sie variieren kaum von Stadt zu Stadt.

Tabelle 2: Näherungsweise ermittelte mittlere Wohnflächen der unterschiedlichen Klassen der Wohneinheiten für größere Städte

Klasse der Wohneinheiten WE	1	2	3-6	7-12	>12
$A_{m,WE}$ [m ²] (Köln)	120	88	74	68	66
$A_{m,WE}$ [m ²] (Düsseldorf)	122	90	78	68	64
$A_{m,WE}$ [m ²] (Mönchengladbach)	120	87	72	69	66
$A_{m,WE}$ [m ²] (Krefeld)	120	90	71	67	65
$A_{m,WE}$ [m²] (gemittelt)	120	89	73	68	65

Für die kleineren Kommunen ist eine gleichzeitige Aufschlüsselung nach Fläche und Zahl der Wohnungen im Gebäude nur eingeschränkt möglich. Es sind dann nur 20m²-Intervalle und insbesondere nur 3 Klassen von WE pro Gebäude verfügbar (1, 2 und >2). Es gibt dann zwei Möglichkeiten der Abschätzung:

- a) Es wird ein gemeinsamer Wert für die Klassen 3-6, 7-12 und >12 ermittelt, der für die entsprechende Kommune repräsentativ ist. Die Güte der Näherung lässt sich mit Hilfe der Großstädte in Tabelle 2 prüfen: da die Wohnflächen im Intervall 3-6 doch signifikant nach oben abweichen, ergäbe sich vermutlich auch für kleinere Städte ein etwas zu hoher Wert für die Intervalle 7-12 und >12, die für die Potentialschätzung relevant sind.

- b) Wegen der geringen Varianz der mittleren Wohnflächen größerer Mehrfamilienhäuser in den Großstädten werden deren Wohnflächen gemittelt und auch für die kleineren Kommunen übernommen (letzte Zeile in Tabelle 2).

In dieser Studie wurde die Variante b) gewählt. Es scheint plausibel, dass die Fläche von Wohneinheiten in größeren Mehrfamilienhäusern nicht sehr vom Standort abhängt, da standortspezifische Kostenfaktoren wie Grundstückspreise bei mehrstöckigen Bauten weniger ins Gewicht fallen als z.B. bei Einfamilienhäusern.

Schritt 2: Schätzung der mittleren Zahl der Wohneinheiten pro Gebäude einer Größenklasse $n_{m,WE}$ nach Anzahl der Wohneinheiten im Gebäude

Die mittlere Zahl der Wohneinheiten pro Gebäude einer Größenklasse, $n_{m,WE}$, ergibt sich, indem für jede Größenklasse die Gesamtzahl der Wohnungen durch die Gesamtzahl der Gebäude geteilt wird. Für die großen Kommunen in diesem Projekt (Köln, Düsseldorf, Mönchengladbach, Krefeld) wäre hier eine Differenzierung nach Baualter möglich, wurde aber im Interesse einer einheitlichen Darstellung verworfen. Für die Größenklasse 7-12 ergibt sich für diese Städte nur eine geringe Variation. Bei großen Wohngebäuden mit >12 WE dominiert in allen Städten das Baualter 1949-1978 sehr deutlich und bestimmt auch weitgehend den Mittelwert, sodass Abweichungen für andere Baujahre wenig ins Gewicht fallen (Abschnitt 3.2.3).

3.2.3. Details zur Schätzung der mittleren Flächen pro Wohneinheit und der mittleren Anzahl an Wohneinheiten

Das in Abschnitt 3.2.2 beschriebene Vorgehen zur Bestimmung der Wohnflächen in den Gebäuden mit KWK-Potential benötigt die mittlere Wohnfläche pro Wohneinheit sowie die mittlere Zahl der Wohneinheiten je Größenklasse des Gebäudes.

Die Ermittlung der mittleren Wohnfläche pro Wohneinheit basiert auf Daten, die nur für die großen Kommunen in diesem Projekt (Köln, Düsseldorf, Mönchengladbach, Krefeld) verfügbar sind. Hier ist in der Zensusdatenbank 2011 (Statistisches Bundesamt, 2014) eine gleichzeitige Aufschlüsselung der Zahl der Wohnungen $n_{i,WE}$ nach Fläche A_i der Wohnung ($10m^2$ -Intervalle i), Zahl der Wohneinheiten im Gebäude und Baujahr möglich.

Tabelle 3 zeigt, dass die Ergebnisse wenig vom Baujahr und der Stadt abhängen. Daher wurden die Mittelwerte verwendet und auch für die kleinen Städte übernommen.

Tabelle 3: Abhängigkeit der mittleren Wohnungsflächen in Gebäuden mit mind. 7 bzw. mind. 13 Wohneinheiten vom Baualter

Mittl. Fläche 7-12 WE [m²]	Düsseldorf	Krefeld	Mönchengladbach	Köln
Vor 1919	71	60	65	72
1919-1948	68	62	67	68
1949-1978	66	66	66	65
1979-1986	75	74	73	74
Gesamt bis 1986	67	66	67	67
Gesamt bis 2011	68	67	69	68

Mittl. Fläche >12 WE [m²]	Düsseldorf	Krefeld	Mönchengladbach	Köln
Vor 1919	62	75	71	68
1919-1948	70	62	48	67
1949-1978	62	64	66	66
1979-1986	69	68	67	65
Gesamt bis 1986	63	65	66	66
Gesamt bis 2011	64	65	66	66

Tabelle 4 zeigt die Abhängigkeit der Wohnungszahl großer Gebäude vom Baualter, die in dieser Form auch nur für die Großstädte ermittelt werden kann. Größere Abweichungen gibt es nur für Gebäude mit mehr als 12 Wohneinheiten in den Jahren bis 1948. Allerdings gibt es nur sehr wenige solche Gebäude, außer in Köln. Aber selbst dort ist die Zahl gering verglichen mit der Gesamtzahl solcher Gebäude. Man macht also keinen großen Fehler, wenn man wie in diesem Projekt die Mittelwerte zugrunde legt. In diesem Fall lassen sich die Mittelwerte allerdings für auch für kleine Kommunen individuell ermitteln. Diese Abhängigkeit wurde daher berücksichtigt.

Tabelle 4: Abhängigkeit der Zahl der Wohnungen in Gebäuden mit mind. 7 bzw. mind. 13 Wohneinheiten vom Baualter

Anzahl WE 7-12 WE	Düsseldorf	Krefeld	Mönchengladbach	Köln
Vor 1919	8,4	7,6	7,7	8,5
1919-1948	8,6	7,8	8,0	8,7
1949-1978	9,1	8,5	8,6	8,8
1979-1986	9,2	8,4	8,2	8,9
Gesamt bis 1986	8,9	8,3	8,5	8,7
Gesamt bis 2011	8,9	8,3	8,5	8,8

Anzahl WE >12 WE	Düsseldorf	Krefeld	Mönchengladbach	Köln
Vor 1919	18,1	8,7	16,9	16,7
1919-1948	14,0	18,2	12,7	16,6
1949-1978	19,1	26,4	22,5	24,1
1979-1986	18,8	17,3	25,7	24,7
Gesamt bis 1986	18,7	24,0	22,6	23,4
Gesamt bis 2011	19,1	23,3	21,8	22,7

3.3. Methode A: Merkmalsverknüpfung in der Zensusdatenbank

In der Zensusdatenbank wird für Methode A „Gebäude“ als statistische Einheit ausgewählt. Als Merkmale dieser statistischen Einheit sollen sowohl „Baujahr (Mikrozensus-Klassen)“ als auch „Anzahl der Wohnungen“ ausgegeben werden.

Zunächst wird die Zahl der Gebäude mit Potential n_{KWK} bestimmt. Über die in der Zensusdatenbank ausgewiesenen Gebäude mit bestimmter WEK und BAK $n_{WE,Bj}$ werden die n_{KWK} ermittelt gemäß

$$n_{KWK} = \sum_{Bj_{min}}^{Bj_{max}} \sum_{WE_{min}}^{WE_{max}} n_{WE,Bj} \quad \text{Gl. 5}$$

Die Gesamtwohnfläche $A_{WE,Bj}$ aller Gebäude, die in der gleichen Größen- (WEK) und Altersklasse (BAK) liegen, ergibt sich aus der Anzahl der Gebäude der jeweiligen Kombination von WEK und BAK $n_{WE,Bj}$ (z.B. 7-12 WE mit einem Baualter zwischen 1958 und 1968), der mittleren Anzahl an Wohnungen der WEK $k_{m,WE}$ und der mittleren Wohnfläche einer WEK $A_{m,WE}$ ermittelt gemäß

$$A_{WE,Bj} = n_{WE,Bj} \cdot k_{m,WE} \cdot A_{m,WE} \quad \text{Gl. 6}$$

Mit dieser Gesamtwohnfläche $A_{WE,Bj}$ wird nun mit Hilfe des spezifischen Heizwärmebedarfs je BAK q_{Bj} der Heizwärmebedarf je WEK und BAK $Q_{WE,Bj}$ ermittelt gemäß

$$Q_{WE,Bj} = A_{WE,Bj} \cdot q_{H,Bj} \quad \text{Gl. 7}$$

Mit Hilfe von $Q_{WE,Bj}$ kann nun der Heizwärmebedarf mit Potential Q_{KWK} ermittelt werden, indem die $Q_{WE,Bj}$ der relevanten WEK und BAK aufsummiert werden gemäß

$$Q_{KWK} = \sum_{Bj_{min}}^{Bj_{max}} \sum_{WE_{min}}^{WE_{max}} Q_{WE,Bj} \quad \text{Gl. 8}$$

Über $Q_{WE,Bj}$ kann auch der Heizwärmebedarf mit Potential je WEK $Q_{KWK,WE}$ und der Heizwärmebedarf mit Potential je BAK $Q_{KWK,Bj}$ ausgewiesen werden gemäß

$$Q_{KWK,WE} = \sum_{Bj_{min}}^{Bj_{max}} Q_{WE,Bj} \quad \text{Gl. 9}$$

$$Q_{KWK,Bj} = \sum_{WE_{min}}^{WE_{max}} Q_{WE,Bj} \quad \text{Gl. 10}$$

Dies wird zum Beispiel zur Angabe des Anteils sehr großer Gebäude (>12 Wohneinheiten) am KWK-Potential verwendet.

Analog zu den Gleichungen 8 und 9 können durch entsprechende Summation über $n_{WE,Bj}$ auch die Zahl der Gebäude mit Potential je WEK $n_{KWK,WE}$ und die Zahl der Gebäude mit Potential je BAK $n_{KWK,Bj}$ ermittelt werden.

3.4. Methode B: Ermittlung über statistische Anteile

Diese Methode wurde zunächst in der Feinkonzeptphase verwendet und in leicht modifizierter Form für die Erstellung der Einzelberichte der elf beteiligten Kommunen. Die Modifikation betraf die Ermittlung der mittleren Wohnflächen verschiedener Gebäudegrößen gemäß Abschnitt 3.2.2.

3.4.1. Anzahl der Wohngebäude mit KWK-Ausbaupotential

Die Berechnung der Anzahl der Wohngebäude mit KWK-Ausbaupotential erfolgt in drei Schritten. Zuerst wird aus dem prozentualen Anteil der Gebäude innerhalb der für den KWK-Ausbau relevanten Baujahresklassen p_{Bj} der Anteil der Gebäude $p_{Bj < Bj_g}$ berechnet, die vor dem Grenzbaujahr Bj_g errichtet wurden:

$$p_{Bj < Bj_g} = \sum_{Bj=0}^{Bj_g} p_{Bj} \quad \text{Gl. 11}$$

Im zweiten Schritt wird aus dem prozentualen Anteil der Gebäude mit einer bestimmten Anzahl an Wohneinheiten p_{WE} **der Anteil der Gebäude mit mehr Wohneinheiten als der Mindestanzahl $p_{WE>WE_{min}}$** gemäß

$$p_{WE>WE_{min}} = \sum_{WE=WE_{min}}^{WE_{max}} p_{WE} \quad \text{Gl. 12}$$

berechnet. Im dritten Schritt ergibt sich die **Anzahl der Wohngebäude mit KWK-Ausbaupotential $n_{KWK,Q}$** aus dem Produkt der beiden zuvor berechneten Anteile und der gesamten Anzahl der Wohngebäude im Quartier n_Q

$$n_{KWK,Q} = n_Q \cdot p_{Bj<BjG} \cdot p_{WE>WE_{min}} \quad \text{Gl. 13}$$

Diese Berechnung muss als Näherung verstanden werden. Sie basiert z.B. auf der vereinfachenden Annahme, dass die Verteilung der Gebäudegrößen nicht vom Baualter abhängt.

3.4.2. Berechnung des Heizwärmebedarfs pro Quartier (Stadtteil)

Für jede Größenklasse WE und jeden Stadtteil Q wird mit der Zahl der Wohngebäude $n_{Q,WE}$ die gesamte Wohnfläche

$$A_{Q,WE} = A_{m,WE,ges} \cdot n_{Q,WE} \quad \text{Gl. 14}$$

der jeweiligen Klasse im Stadtteil berechnet. Für den KWK-Ausbau relevant sind nur die größeren Gebäude. Über diese Größenklassen summiert ergibt sich rechnerisch die für KWK verfügbare Gesamtwohnfläche

$$A_{KWK,Q} = \sum_{WE=WE_{min}}^{WE_{max}} A_{Q,WE} \quad \text{Gl. 15}$$

im Stadtteil.

Anschließend erfolgt in drei Schritten die Berechnung des jährlichen Heizwärmebedarfs $Q_{H,Q}$ innerhalb eines Quartiers, da dieser für das KWK-Ausbaupotential relevant ist. Als erstes wird die Gesamtwohnfläche mit einem bestimmten Baujahr

$$A_{KWK,Bj,Q} = A_{KWK,Q} \cdot p_{Bj} \quad \text{Gl. 16}$$

mit dem Wohnflächenanteil des entsprechenden Baujahres p_{Bj} berechnet. Als zweites wird der jährliche Heizwärmebedarf dieser Wohnflächen

$$Q_{H,Q,Bj} = A_{KWK,Bj,Q} \cdot q_{Bj} \quad \text{Gl. 17}$$

mit dem spezifischen Heizwärmebedarf des Baualters q_{Bj} berechnet. Im dritten Schritt werden die jährlichen Heizwärmebedarfe der Wohngebäude mit den Baujahren bis zum vorher definierten Grenzbaujahr im Quartier gemäß

$$Q_{H,Q} = \sum_{Bj=0}^{Bj_G} Q_{H,Q,Bj} \quad \text{Gl. 18}$$

aufsummiert.

Dieser Wert enthält nicht die benötigte Wärmeenergie zur Warmwasserbereitung und ist in diesem Sinne als konservative, untere Abschätzung anzusehen.

Der jährliche Heizwärmebedarf des Quartiers $Q_{H,Q}$ ist die maximale Wärmemenge, die theoretisch durch KWK-Anlagen gedeckt werden kann; also das maximale thermische KWK-Ausbaupotential. Das umsetzbare KWK-Ausbaupotential ist niedriger als die hier berechnete Wärmemenge; neben dem Baujahr und der Anzahl an Wohneinheiten des Gebäudes beeinflussen weitere Faktoren das KWK-Ausbaupotential. Direkten Einfluss auf den Heizwärmebedarf eines Gebäudes haben der energetische Sanierungsstand des Gebäudes und das individuelle Nutzerverhalten der Bewohnerinnen. Auch die Art und das Alter der aktuell installierten Heiztechnik sowie das Raumangebot im Heizungskeller beeinflussen das KWK-Ausbaupotential. Diese Faktoren können jedoch nur bei Betrachtung der einzelnen Gebäude berücksichtigt werden.

3.4.3. Spezifisches Ausbaupotential pro Gebietsfläche oder Gebäude

Um die Ergebnisse zwischen den Quartieren vergleichen zu können, werden zusätzlich spezifische Größen berechnet. Dabei wird das KWK-Ausbaupotential auf die Merkmale

- Gebietsfläche; spez. Ausbaupotential Gebietsfläche AP_F (Gl. 19)
- und Gebäude; spez. Ausbaupotential Gebäude, AP_G (Gl. 20)

bezogen. Die maximale Anzahl installierbarer KWK-Anlagen entspricht der Anzahl an Gebäuden mit KWK-Ausbaupotential im Untersuchungsgebiet.

$$AP_F = \frac{Q_{H,Q}}{A_Q} \quad \text{Gl. 19}$$

$$AP_G = \frac{Q_{H,Q}}{n_{KWK,Q}} \quad \text{Gl. 20}$$

Das *spezifische KWK-Ausbaupotential Gebäude* AP_G gibt Auskunft über den Aufwand bzw. die Effizienz einzelner KWK-Maßnahmen. Wenn mit wenigen Gebäuden ein gleich hohes Potential umgesetzt werden kann wie mit vielen Gebäuden, so ist der Projektaufwand geringer.

Das *spezifische KWK-Ausbaupotential Gebietsfläche* AP_F ist vergleichbar mit der von Planern häufig herangezogenen Wärmebedarfsdichte (Pol, O., Shoshtari, S., 2010) und kann somit Informationen über die mögliche Ausgestaltung der KWK-Struktur liefern. Bei einem hohen AP_F in einem Stadtteil könnten sich somit zentrale KWK-Anlagen eher anbieten als kleinere, dezentrale Lösungen.

In Quartieren mit hohen Kennzahlen für den KWK-Ausbau empfiehlt sich eine detaillierte Betrachtung der Gebäude- und Einwohnerstruktur, indem kleinere Untersuchungsgebiete definiert werden, für die Kennzahlen erneut berechnet werden. Je kleiner das Untersuchungsgebiet, desto größer ist die Möglichkeit, eine manuelle und detaillierte Datenerfassung zu realisieren, mit der genauere Ergebnisse erzielt werden können. Eine detaillierte Datenerfassung kann z.B. eine Begehung des Untersuchungsgebiets zur Einschätzung der Gebäudesubstanz beinhalten oder eine Auswertung der Energieverbräuche und verwendeten Heizungsanlagen mittels einer Befragung.

3.5. Berücksichtigung bestehender Fernwärmenetze: Methode A

Die oben beschriebene Potentialermittlung nach Berechnungsmethode A ist bis hier hin unabhängig von der Art und Weise, wie die Wärme über KWK bereitgestellt wird. Es wird also nicht unterschieden, ob sich das Potential Q_{KWK} auf zentrale KWK-Fernwärme bezieht oder auf dezentrale KWK in Form von BHKW's. Im Folgenden soll aber genau dieses technische Potential für dezentrale KWK ermittelt werden. Gebäude in Fernwärmeversorgungsgebieten kommen nicht für die Nutzung von dezentralen

KWK-Lösungen infrage. Diese Gebäude dürfen folglich nicht in das gesamte technische dezentrale KWK-Potential $Q_{dez,KWK}$ mit einberechnet werden. Daher muss das Potential, welches auf diese Gebäude fallen würde, vom bisher ermittelten Potential abgezogen werden. Auch hier bietet die Zensusdatenbank Ansatzpunkte, diese Gebäude speziell zu ermitteln.

3.5.1. Großstädte (>100.000 Einwohner)

Wird in der Zensusdatenbank „Gebäude“ als statistische Einheit ausgewählt, so lässt sich als Merkmal auch die „Heizungsart“ und im speziellen auch „Fernheizung (Fernwärme)“ auswählen. Ferner kann dies für die betrachteten Großstädte auch gleichzeitig mit den Merkmalen „Baujahr (Mikrozensus-Klassen)“ und „Gebäudetyp-Größe“ kombiniert werden. Das Merkmal „Gebäudetyp-Größe“ beinhaltet die gleichen Intervalle wie im oben betrachteten Merkmal „Zahl der Wohnungen im Gebäude“. Analog zu Abschnitt 2.3 werden nur die Gebäude mit KWK-Potential, d.h. mit mehr als sechs Wohneinheiten und mit einem Baujahr bis 1986 betrachtet. Für jede Kombination der Merkmale wird die jeweilige Anzahl der Gebäude mit Fernwärme-Heizung $n_{FW,Bj,WE}$ abgefragt.

Die weitere Berechnung des gesamten technischen dezentralen KWK-Potentials folgt analog der Berechnung zu Q_{KWK} . Allerdings wird zunächst die Anzahl der Gebäude mit Potential und Fernwärme $n_{FW,Bj,WE}$ von der zuvor ermittelten Anzahl der Gebäude mit Potential $n_{WE,Bj}$ subtrahiert:

$$n_{WE,Bj,exkl.FW} = n_{WE,Bj} - n_{FW,Bj,WE}. \quad (3.5-15)$$

Die weitere Berechnungsmethodik folgt nun den Gleichungen 6ff. aus der oben beschriebenen Berechnungsmethodik. Dabei wird allerdings $n_{WE,Bj}$ durch $n_{WE,Bj,exkl.FW}$ ersetzt. Als Ergebnis erhält man abschließend das dezentrale technische KWK-Potential $Q_{dez,KWK}$.

3.5.2. Kleine Städte (<100.000 Einwohner)

Für Mittel- und Kleinstädte ist das Vorgehen aus Abschnitt 3.5.1 nicht möglich, da für diese Städte in der Zensusdatenbank die Merkmale „Fernheizung (Fernwärme)“, „Baujahr (Mikrozensus-Klasse)“ und „Gebäudetyp-Größe“ unter der statistischen

Einheit „Gebäude“ nicht miteinander kombiniert werden können. Allerdings ist es möglich, das Merkmal „Fernheizung (Fernwärme)“ einzeln mit den anderen beiden beschriebenen Merkmalen zu verknüpfen. Die Ausgabe je Stadt enthält die Anzahl der alten Gebäude (Baujahr vor 1986) mit Fernwärme sowie die Anzahl der Gebäude mit sieben oder mehr Wohneinheiten mit Fernwärme. Um unter das Potential zu fallen, müssen allerdings beide Kriterien erfüllt sein. Dies kann maximal auf die Anzahl der Gebäude zutreffen, die im Vergleich der beiden Auswertungen geringer ist. Hierbei ist zu anzumerken, dass die tatsächliche Anzahl der Gebäude, auf welche die beiden Kategorien zutreffen, i.d.R. geringer sein wird. Im Hinblick auf das Gesamtergebnis wird daher der Heizwärmebedarf Q_{FW} , der bereits über Fernwärme gedeckt wird, überschätzt und somit das KWK-Potential $Q_{dez,KWK}$ unterschätzt.

Bei den betrachteten Städten war die Anzahl der Gebäude mit Fernwärme und WEK mit sieben oder mehr WE stets geringer als die Anzahl der alten Gebäude mit Fernwärmezugang. Die ermittelte Gebäudeanzahl soll nun als Berechnungsgrundlage für das Vorgehen wie in Abschnitt 3.5.1 dienen. Um den Heizwärmebedarf mit Potential $Q_{dez,KWK}$ zu quantifizieren, besteht dabei weiterhin das Problem, dass diese Anzahl keiner Baualtersklasse zugeordnet werden kann. Im Folgenden wird daher eine Fallunterscheidung von zwei Methoden der Zuordnung, A.1 und A.2, zu einer Baualtersklasse unternommen.

Die erste Methode A.1 stellt die konservativere Variante dar. Hierbei werden sämtliche ermittelten Gebäude mit Fernwärme der Baualtersklasse 1919 bis 1948 zugeordnet. Diese hat den höchsten spezifischen Heizwärmebedarf, wodurch im Ergebnis Q_{FW} den maximal möglichen Wert annimmt. Dadurch wird das gesamte technische KWK-Potential $Q_{dez,KWK}$ tendenziell zu klein geschätzt.

Eine Alternative hierzu ist die Methode A.2. Hierbei werden die ermittelten Gebäude mit Fernwärme auf die verschiedenen Baualtersklassen aufgeteilt. Als Grundlage dienen hier die Ergebnisse aus dem Zensus, die sich ergeben, wenn die Merkmale „Fernheizung (Fernwärme)“ und „Baujahr (Mikrozensus-Klasse)“ miteinander kombiniert werden (s.o.). Die prozentuale Verteilung der Gebäude auf die jeweiligen Baualtersklassen wird dabei übertragen auf die per Ausschlussverfahren ermittelten

Gebäude mit Potential und Fernwärme. Das Ergebnis ist eine Näherung an die tatsächliche Verteilung dieser Gebäude.

3.6. Berücksichtigung bestehender Fernwärmenetze: Methode B

Für Berechnungsmethode B ist eine Berücksichtigung von Fernwärmenetzen nur möglich, wenn die Daten nach Stadtteilen aufgeschlüsselt vorliegen. Dann werden nur jene Stadtteile betrachtet, die nicht an ein Fernwärmenetz angeschlossen sind. Daher ist es nicht notwendig, einen Fernwärmeanteil vom ermittelten Potential abzuziehen.

3.7. Vorgehen bei Datenmangel bezüglich Verteilung des Gebäudebestands

Der Heizwärmebedarf eines Wohngebäudes berechnet sich aus der Wohnfläche des Wohngebäudes und aus dem spezifischen Heizwärmebedarf pro Quadratmeter, der überschlägig über das Baualter ermittelt wird (Abschnitt 3.2). Diese Daten liegen nicht für alle Kommunen aufgeschlüsselt nach den einzelnen Stadtteilen vor. Auch die Anzahl der Wohngebäude in den einzelnen Stadtteilen liegen teils nicht vor. Ohne die untergliederten Daten ist eine stadtteilbezogene Potentialermittlung des KWK-Ausbaus mit den beschriebenen Methoden nicht möglich.

Auf Basis der Einwohnerzahlen können mit ortskundigen Verwaltungsangestellten Gebiete identifiziert werden, in denen eine detaillierte Betrachtung der Gebäudestruktur zur Ermittlung eines umsetzbaren KWK-Ausbaupotentials erfolgversprechend ist. Falls diese Information nicht gesichert von der Stadt erbracht werden kann, ist die Begehung von Wohngebieten, die größtenteils aus Mehrfamilienhäusern bestehen, mit einer Architektin eine Möglichkeit, die Baujahre der Wohngebäude über die Fassade, Dachaufbauten und Bausubstanz einzuschätzen.

Zusätzlich gibt es weitere Methoden mit unterschiedlich hohem Aufwand, um die Gebäudestruktur (Anzahl der Wohneinheiten und Baujahr) eines Wohngebiets einzuschätzen:

- Kartographische Recherche über Luftbilder (im Internet),
- Vergleich historischer und aktueller Karten oder Luftbildaufnahmen,
- Recherche im Bauaktenarchiv und
- Recherche im Stadtarchiv.

Je nach Aufwand müssen zusätzliche Personalkosten berücksichtigt werden.

Bei der kartographischen Recherche über Luftbilder im Internet können größere Wohngebäude identifiziert (vgl. als Beispiel Abbildung 6) werden. Über die kartographische Recherche im Internet können Baufachleute auch eine grobe Einschätzung des Baualters anhand von Merkmalen der Fassade oder der Bedachung vornehmen.

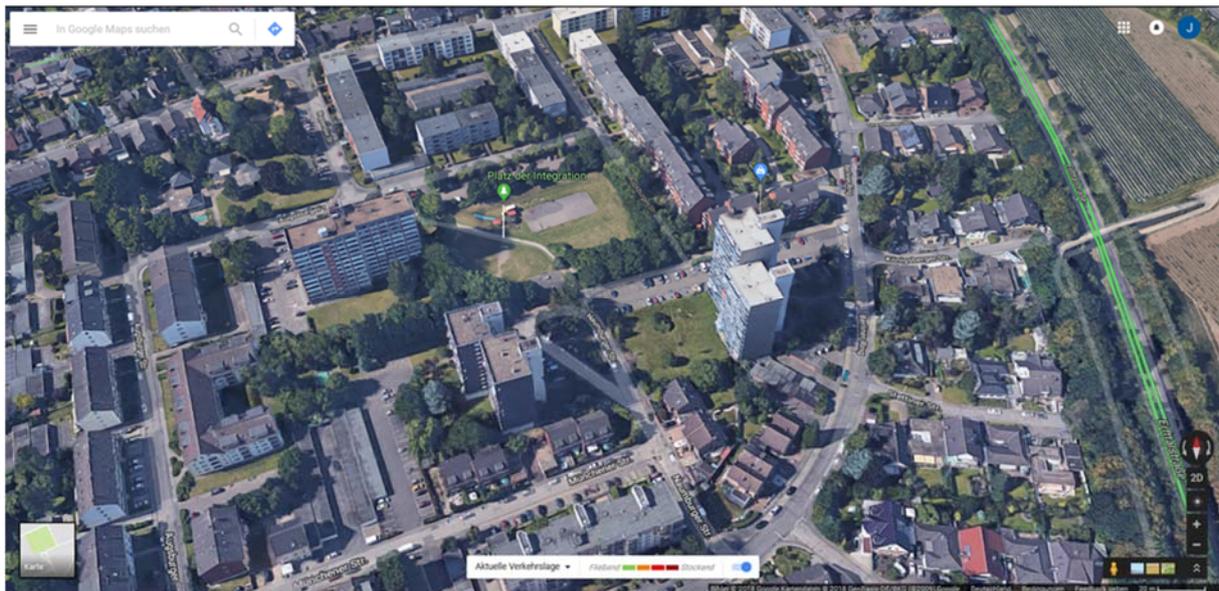


Abbildung 6: Luftbildausschnitt am Berliner Ring in Kerpen (Quelle: Google Maps, 2018)

Mit dem Vergleich historischer und aktueller Karten oder Luftbildaufnahmen können Zeiträume identifiziert werden, innerhalb derer Wohngebiete entstanden sind. Damit lassen sich Wohngebiete identifizieren, deren Baujahr für den KWK-Ausbau interessant ist.

Mit der Recherche im Bauaktenarchiv können detaillierte Informationen über einzelne Wohngebäude eingeholt werden. In den Bauakten findet man das Baujahr, die umbaute Fläche, die Wohn- und Nutzfläche, die Anzahl der Wohneinheiten und evtl. erfolgte Aus- und Umbauten sowie nachträglich durchgeführte Gebäudedämmung. Die Errichtung oder der Ersatz der Heizungsanlage bzw. Feuerungsanlage und Heizenergieträgerlagerstätte wird in einer zusätzlichen Akte, die sich ebenfalls im Bauaktenarchiv befindet, dokumentiert; für manche Gebäude befinden sich diese Informationen auch in der eigentlichen Bauakte.

Bei der Recherche im Stadtarchiv können durch Ausschlussverfahren Stadtgebiete identifiziert werden, die während der beiden Weltkriege erhalten geblieben sind, die somit auf Grund ihrer Baujahre für den KWK-Ausbau interessant sind. Auch große Bauprojekte können durch eine Recherche im Stadtarchiv in Erfahrung gebracht werden und einem Baujahr zu geordnet werden.

Auf Grundlage der detaillierteren Informationen über die Gebäudestruktur kann anschließend ein erstes Ausbaupotential berechnet werden.

Mit der Stadt Kerpen wurde exemplarisch die detaillierte Betrachtung eines Wohngebiets mittels einer Recherche im Bauaktenarchiv der Stadt durchgeführt. Dazu wurden vorab mit Mitarbeitern der Stadt Kerpen aus den Bereichen *Planen, Bauen und Umweltschutz; strategische Stadtentwicklung* und *Zentrales Bau- und Wohnungsmanagement* mehrere Wohngebiete identifiziert, in denen die Merkmale der Wohngebäude den Kriterien für den KWK-Ausbau entsprechen könnten. Von diesen Wohngebieten wurde eines ausgewählt, um die Bauakten dieser Wohngebäude zu sichten und die benötigten Daten

- Baujahr,
- Anzahl der Wohneinheiten und
- Wohnfläche

für die Berechnung des KWK-Ausbaupotentials zu entnehmen. Details zum Vorgehen finden sich im Einzelbericht zur Stadt Kerpen.

4. Auswahl der Kommunen

Bei der Auswahl der Kommunen lag der Schwerpunkt auf der Übertragbarkeit der Methode zur Quartiersauswahl auf weitere Kommunen in NRW. Das Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung (BBSR, 2016) unterscheidet drei Typen zur Kategorisierung einer Kommune:

- Stadt- und Gemeindetyp,
- Raumtyp und
- siedlungsstruktureller Kreistyp.

In der Auswahl der teilnehmenden Kommunen sollten sich möglichst alle Kommunen in NRW wieder finden. Nach der Analyse der Kommunen in NRW (Abschnitt 4.1) wurde eine Vorauswahl an Kommunen getroffen, deren Auswertung eine Aussage über die Übertragbarkeit der Methode auf weitere Kommunen ermöglicht. Da die Teilnahme für die Kommunen freiwillig ist, wurden insgesamt 18 Kommunen angefragt, von denen sich elf Kommunen bereiterklärt haben, an dem Projekt teilzunehmen (Abschnitt 4.2).

4.1. Typisierung von Kommunen

Die drei Typen zur Kategorisierung einer Kommune haben jeweils unterschiedliche Merkmale, nach denen die Kommune typisiert wird. Beim **Stadt- und Gemeindetyp** wird im ersten Schritt an Hand der Einwohnerzahl und der zentralörtlichen Funktion zwischen Landgemeinde oder Stadt differenziert. Städte werden an Hand ihrer Einwohnerzahl weiter untergliedert in Groß-, Mittel- und Kleinstadt. Der **Raumtyp** wird an Hand zweier Merkmale definiert; zum Einen an Hand der Besiedlung (Besiedlungsdichte und Siedlungsflächenanteil) und zum anderen an Hand der Lage. Der **siedlungsstrukturelle Kreistyp** wird nicht auf Basis der Stadt- und Landkreise, sondern auf Basis der Kreisregionen gebildet (Burgdorf, M. et al., 2012). Die Merkmale sind der Bevölkerungsanteil in Groß- und Mittelstädten, die Einwohnerdichte der Kreisregion und die Einwohnerdichte der Kreisregion ohne Groß- und Mittelstädte.

4.1.1. Stadt- und Gemeindetypen

Der Stadt- und Gemeindetyp ordnet die Einheitsgemeinden und Gemeindeverbände in die Kategorien Groß-, Mittel-, Kleinstädte und Landgemeinden. Der Stadt- und

Gemeindetyp konzentriert sich auf die Funktion und die Bedeutung der Städte mit Blick auf ihre Größe.

Kriterien sind die Größe der Gemeinde (Bevölkerungszahl) und ihre zentralörtliche Funktion. Hat eine Gemeinde innerhalb eines Gemeindeverbandes oder die Einheitsgemeinde selbst mindestens 5.000 Einwohner oder mindestens grundzentrale Funktion, dann wird diese als "Stadt" bezeichnet. Trifft eine dieser Bedingungen auf den Gemeindeverband bzw. die Einheitsgemeinde nicht zu, dann handelt es sich um eine Landgemeinde. Von den 4.578 Einheiten sind 1.355 Landgemeinden und 3.223 Städte.

Die Gruppe der Städte wird des Weiteren wie folgt unterschieden:

- Großstadt: Gemeinde eines Gemeindeverbandes oder Einheitsgemeinde mit mindestens 100.000 Einwohnern; diese Städte haben meist oberzentrale Funktion, mindestens jedoch mittelzentrale. Die Gruppe der Großstädte kann unterschieden werden in große Großstädte mit mind. 500.000 Einwohnern und kleinere Großstädte mit weniger als 500.000 Einwohnern.
- Mittelstadt: Gemeinde eines Gemeindeverbandes oder Einheitsgemeinde mit 20.000 bis unter 100.000 Einwohnern; überwiegend haben diese Städte mittelzentrale Funktion. Die Gruppe der Mittelstädte kann unterschieden werden in Große Mittelstadt mit mind. 50.000 Einwohnern und Kleine Mittelstadt mit weniger als 50.000 Einwohnern.
- Kleinstadt: Gemeinde eines Gemeindeverbandes oder Einheitsgemeinde mit 5.000 bis unter 20.000 Einwohnern oder mindestens grundzentraler Funktion. Die Gruppe der Kleinstädte kann unterschieden werden in Größere Kleinstadt mit mind. 10.000 Einwohnern und Kleine Kleinstadt mit weniger als 10.000 Einwohnern.

(BBSR, 2012)

Abbildung 7 zeigt die Stadt- und Gemeindetypen in NRW. Es ist deutlich zu erkennen, dass es in NRW so gut wie keine Landgemeinden gibt, nur im Süd-Westen NRWs (südlich von Bonn und Aachen) sind zwei kleine Bereich als Landgemeinde definiert.

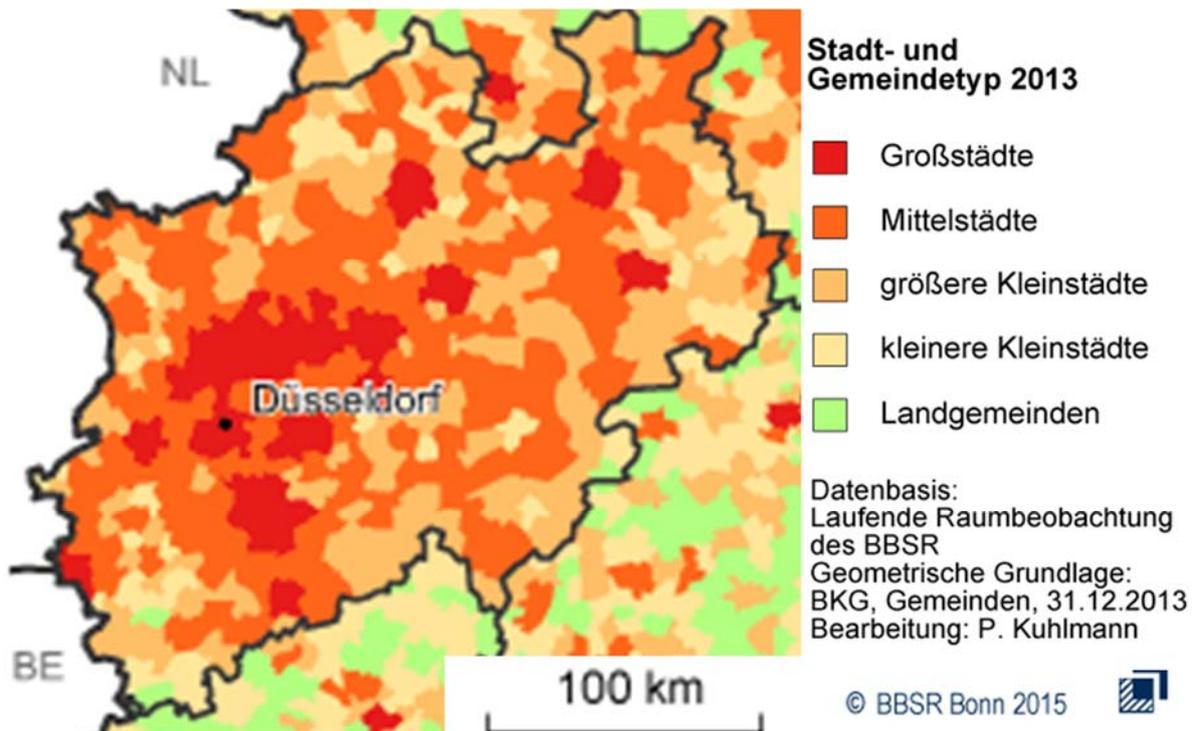


Abbildung 7: Karte der Stadt- und Gemeindetypen in Nordrhein-Westfalen

4.1.2. Raumtypen

Das Typisierungskonzept beruht auf der Betrachtung zweier räumlicher Basisstrukturmerkmale,

- der Besiedelung durch Unterscheidung zwischen überwiegend städtisch und ländlich geprägten Gebieten, klassifiziert nach Bevölkerungsdichte und Siedlungsflächenanteil (lokale/kleinräumige Maßstabsebene);
- der Lage, d.h. Unterscheidung zwischen zentral und peripher gelegenen Räumen, klassifiziert nach potenziell erreichbarer Tagesbevölkerung; (regionale/großräumige Maßstabsebene).

Abbildung 8 zeigt die siedlungsstrukturelle Prägung in NRW, über die der Raumtyp definiert wird. Es zeigt sich, dass NRW überwiegend städtisch geprägt ist, zu den Ländergrenzen dünnt die Siedlungsstruktur sowohl zu teilweise städtisch geprägten als auch ländlich geprägten Regionen aus.

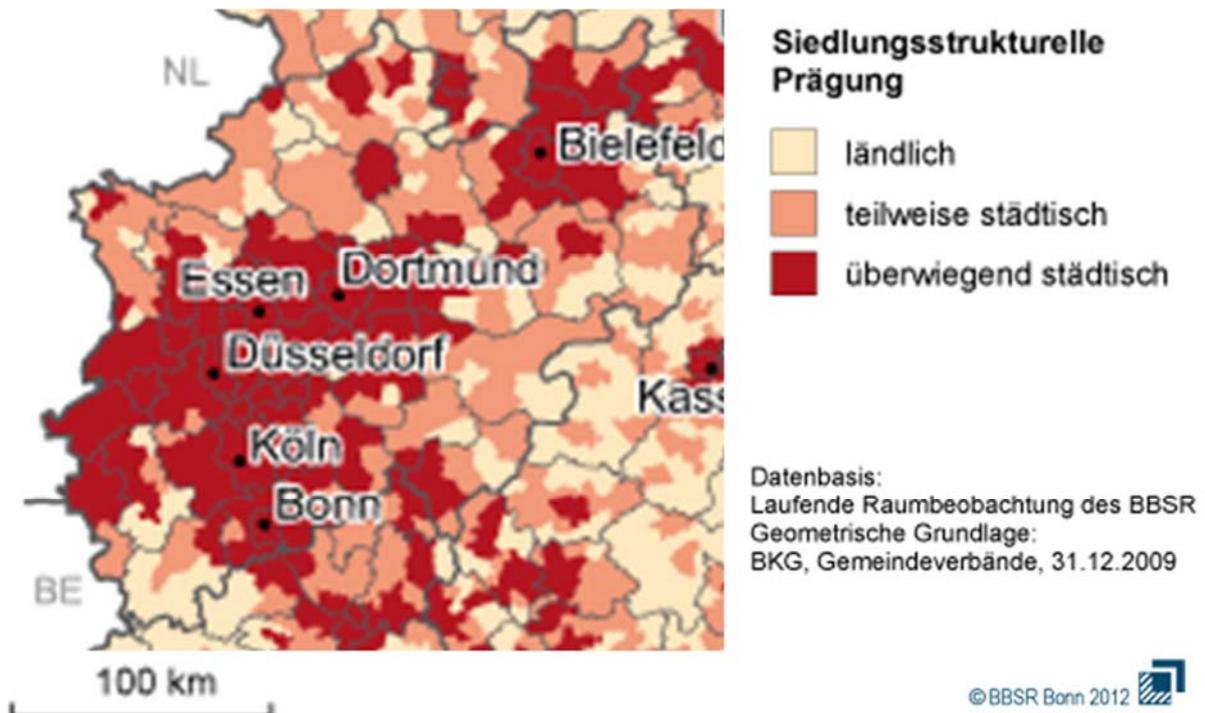


Abbildung 8: Karte der Raumtypen nach dem Kriterium der Besiedlung von Nordrhein-Westfalen

4.1.3. Siedlungsstrukturelle Kreistypen

Die räumliche Ebene zur Bildung der Kreistypen sind nicht die 402 Stadt- und Landkreise selbst, sondern die 363 Kreisregionen.

Für die Typenbildung werden folgende Siedlungsstrukturmerkmale herangezogen:

- Bevölkerungsanteil in Groß- und Mittelstädten,
- Einwohnerdichte der Kreisregion,
- Einwohnerdichte der Kreisregion ohne Berücksichtigung der Groß- und Mittelstädte.

Auf diese Weise können vier Gruppen unterschieden werden:

1. Kreisfreie Großstädte: Kreisfreie Städte mit mind. 100.000 Einwohnern;
2. Städtische Kreise: Kreise mit einem Bevölkerungsanteil in Groß- und Mittelstädten von mind. 50% und einer Einwohnerdichte von mind. 150 E./km²; sowie Kreise mit einer Einwohnerdichte ohne Groß- und Mittelstädte von mind. 150 E./km²;
3. Ländliche Kreise mit Verdichtungsansätzen: Kreise mit einem Bevölkerungsanteil in Groß- und Mittelstädten von mind. 50%, aber einer

Einwohnerdichte unter 150 E./km², sowie Kreise mit einem Bevölkerungsanteil in Groß- und Mittelstädten unter 50% mit einer Einwohnerdichte ohne Groß- und Mittelstädte von mind. 100 E./km²;

4. Dünn besiedelte ländliche Kreise: Kreise mit einem Bevölkerungsanteil in Groß- und Mittelstädten unter 50% und Einwohnerdichte ohne Groß- und Mittelstädte unter 100 E./km²;

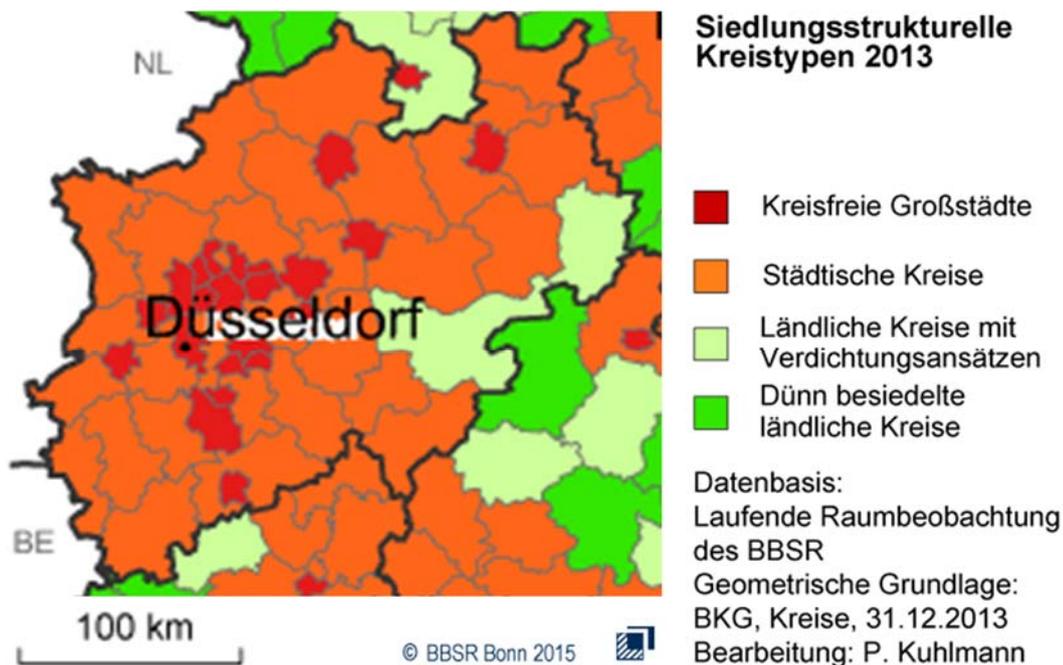


Abbildung 9: Karte der strukturellen Kreistypen in Deutschland

Abbildung 9 zeigt die siedlungsstrukturellen Kreistypen in NRW. In NRW sind größtenteils städtische Kreise vertreten, einige Kreisfreie Städte prägen insbesondere das Ruhrgebiet (nord-östlich von Düsseldorf), im Osten NRW gibt es noch ländliche Kreise, in denen sich allerdings schon Verdichtungsansätze abzeichnen. Dünn besiedelte ländliche Kreise gibt es in NRW nicht.

4.2. Ausgewählte Kommunen

Ziel bei der Auswahl der teilnehmenden Kommunen war es, die Übertragbarkeit der KWK-Potentialanalyse auf weitere Kommunen in NRW zu prüfen. Da das KWK-Potential sowohl von der Gebäudestruktur als auch von der Einwohnerstruktur einer Kommune abhängt, sollten möglichst alle in NRW vertretenen Strukturtypen in der Auswahl repräsentiert sein. Insgesamt wurden 17 Kommunen angefragt an dem

Projekt teilzunehmen. Folgende 11 Kommunen haben sich für eine Teilnahme entschieden:

- Düsseldorf,
- Köln,
- Mönchengladbach,
- Arnsberg,
- Troisdorf,
- Lüdenscheid,
- Kerpen,
- Grevenbroich,
- Kleve,
- Herdecke und
- Marsberg.

Mit Düsseldorf und Köln sind die beiden größten Städte NRWs im Projekt vertreten. Außerdem nehmen noch eine kleine Großstadt, fünf große Mittelstädte, zwei kleine Mittelstädte und eine große Kleinstadt am Projekt teil. Damit ist NRW bezogen auf die Stadt- und Gemeindetypen gut repräsentiert. Bezogen auf die Raumtypen sind sowohl der teilweise städtische also auch der ländliche Raumtyp in der Auswahl etwas unterrepräsentiert. Da aber beide Raumtypen vertreten sind, lässt sich die Übertragbarkeit der Potentialanalyse zumindest einschätzen. Bezogen auf die siedlungsstrukturellen Kreistypen ist NRW mit drei kreisfreien Städten, sechs Kommunen in städtischen Kreisen und zwei Kommunen in ländlichen Kreisen mit Verdichtungsansatz gut repräsentiert.

4.2.1. Düsseldorf

Düsseldorf ist die zweitgrößte Stadt des Bundeslandes Nordrhein-Westfalens (NRW) und gleichzeitig Landeshauptstadt. Düsseldorf liegt am Rhein und weist eine Bevölkerung von 603.210 Einwohnern (Stand: 31.12.2015) bei einer Fläche von 21.741 ha (Stand: 31.12.2014) auf (Düsseldorf, 2016). Der Stadtyp von Düsseldorf ist Großstadt, der Raumtyp ist überwiegend städtisch und der siedlungsstrukturelle Typ ist kreisfreie Stadt.

So wie viele andere Städte oder Kommunen in NRW und Deutschland arbeitet die Stadt Düsseldorf verstärkt daran, den Klimaschutz und die Energiewende innerhalb der Stadtgrenzen, besonders im Bereich von Wohngebäuden, zu verbessern. Aus einem selbst erstellten Wärmekataster wurden in 2009 und 2010 zwei Solarsiedlungen im Medienhafen und in Garath errichtet. Des Weiteren wurde ein Projekt in 2012 in einem Neubaugebiet vollendet, in dem flächendeckend Geothermie- und Solaranlagen eingesetzt werden. Auch fördert die Stadt Düsseldorf mit einem eigens eingeführten Förderprogramm („Klimafreundliches Wohnen“) die energetische Sanierung von privaten Wohngebäuden. Über ein öffentlich zugängliches Solarkataster können Bürgerinnen das Nutzungspotential auf ihrem eigenen Dach einsehen. In den Zukunftsszenarien für Düsseldorf wird besonders der Ausbau des Fernwärmenetzes, was in Verbindung mit dem neugebauten GuD-Kraftwerk an der Lausward weiter ausgedehnt werden soll, ein hohes Potential zugeschrieben.

Die Stadt Düsseldorf nimmt am Projekt teil, um das übergeordnete Ziel – Übertragbarkeit auf wandere Kommunen – des Arbeitspaketes zu unterstützen. Als zweitgrößte Stadt in NRW und Landeshauptstadt mit über einer halben Millionen Einwohner hat Düsseldorf eine Infrastruktur, die der von Metropolen ähnelt. Damit haben die Auswertungsergebnisse eine eigenständige Aussagekraft für die Übertragbarkeit der Quartiersauswahl. Aktuell ist keine konkrete Anwendung der Ergebnisse dieses Projektes geplant.

4.2.2. Köln

Köln ist die größte Stadt in Nordrhein-Westfalens mit 1.069.192 Einwohnern (Stand: 2015) bei einer Fläche von 405 km². Köln liegt am Rhein. Der Stadttyp von Köln ist Großstadt, der Raumtyp ist überwiegend städtisch und der siedlungsstrukturelle Typ ist kreisfreie Stadt.

Die Stadt Köln arbeitet zu den Themen Klimaschutz und Energiewende mit dem Energieversorger RheinEnergie zusammen. Ende 2007 hat die RheinEnergie das Klimaschutzprogramm "Energie & Klima 2020" ins Leben gerufen. Für 25 Millionen Euro werden vier Bausteine von Energie & Klima 2020 umgesetzt:

1. Ausbau des Fernwärmenetzes,
2. Ausbau erneuerbarer Energie,

3. Steigerung der Energieeffizienz sowie
4. Förderprogramm der KlimaBausteine (bis Ende 2015 KlimaKreis Köln).

Der Ausbau des Fernwärmenetzes bezieht sich auf die Stadtteile Ehrenfeld, Lindenthal, Bayenthal und Zollstock. Zusätzlich werden mit Hilfe der zweiten Fernwärme-Rheinquerung von Mülheim ausgehend weitere Bereiche des rechtsrheinischen Kölns angeschlossen. Beim Ausbau erneuerbarer Energie werden nicht nur Wind-, Sonnen- und Bioenergieanlagen in Köln, deutschlandweit und europaweit installiert, sondern den Kunden auch 100%-iger ÖkoStrom angeboten. Zur Steigerung der Energieeffizienz berät die RheinEnergie sowohl private Haushalte als auch sogenannte Großkunden, um den Energieverbrauch nachhaltig zu reduzieren. Das Fördergremium KlimaKreis Köln mit 21 Experten aus Wirtschaft, Politik und Wissenschaft bekam 2007 den Auftrag, zukunftsweisende Klimaschutzprojekte in der Region zu identifizieren und zu fördern. (RheinEnergie, 2014)

Die Stadt Köln fördert u.a. mit der Stabsstelle Klimaschutz zahlreiche Klimaschutzmaßnahmen im Energiebereich, wie z.B. die Sanierung alter Wohngebäude mit dem Programm ALTBAUNEU (Köln, 2018a), Maßnahmen zur Energieeinsparung im Projekt Klimaschutz Community Köln (Köln, 2017) oder der Plattform SmartCity Cologne unterschiedliche Projekte zum Klimaschutz und zur Energiewende, bei der jeder mitmachen um gemeinsam intelligente Ideen und zukunftsweisende Technologien zu entwickeln (RheinEnergie, 2016). Die Stabsstelle Klimaschutz koordiniert die strategische Ausrichtung des gesamtstädtischen Klimaschutzprozesses und ist zentrale Ansprechpartnerin zu den Themen Klimaschutz und SmartCity Cologne für Verwaltung, Politik, Investoren und Unternehmen in Köln (Köln, 2018b).

4.2.3. Mönchengladbach

Mönchengladbach ist in Nordrhein-Westfalen Bestandteil der Metropolregion Rhein-Ruhr und weist eine Bevölkerung von 266.586 Einwohnerinnen (Mönchengladbach, 2015) bei einer Fläche von 170,4 km² (Stand: Februar 2018) auf (Mönchengladbach, 2018a). Der Stadttyp von Mönchengladbach ist kleine Großstadt, der Raumtyp ist überwiegend städtisch und der siedlungsstrukturelle Typ ist kreisfreie Stadt.

Die Stadt Mönchengladbach trat 2009 dem „Klima-Bündnis der europäischen Städte mit indigenen Völkern der Regenwälder e.V.“ bei und verpflichtete sich damit zur Verringerung der CO₂-Emissionen um 10% innerhalb von jeweils fünf Jahren. Bereits in 2011 wurde ein Klimaschutzkonzept für die Stadt Mönchengladbach fertiggestellt, welches Handlungsmöglichkeiten aufzeigt, um den CO₂-Ausstoß zu verringern. Im Rahmen des Klimaschutzkonzeptes sollen zusätzlich Maßnahmen zur Energieeinsparung, Energieeffizienz und zur CO₂-freien Energieerzeugung berücksichtigt werden (Mönchengladbach, 2018b).

4.2.4. Arnsberg

Arnsberg liegt in Nordrhein-Westfalen im Sauerland und weist eine Bevölkerung von 78.562 Einwohnerinnen (Stand: 2016) bei einer Fläche von 194 km² auf (Arnsberg, 2016). Der Stadtyp von Arnsberg ist große Mittelstadt, der Raumtyp ist teilweise städtisch und der siedlungsstrukturelle Typ ist ländlicher Kreis mit Verdichtungsansatz.

Die Stadt Arnsberg verfügt über ein integriertes Klimaschutzkonzept für die Bereiche Energie, Klimaschutz und Klimawandelfolgen für die Zukunft (Arnsberg, 2018). Zudem ist die Stadt Arnsberg Teil der Nationalen Klimaschutzinitiative und hat als erste Stadt im Hochsauerlandkreis den Zertifizierungsprozess für den European Energy Award ® durchlaufen und wurde 2016 als „Europäische Klimaschutz- und Energiekommune“ ausgezeichnet. Darüber hinaus gibt es weitere Initiativen der Stadt Arnsberg, beispielsweise das Arnsberger Nachhaltigkeitsfestival (Arnsberg, 2018).

4.2.5. Troisdorf

Troisdorf liegt in Nordrhein-Westfalen im Rhein-Sieg-Kreis zwischen Köln und Bonn und weist eine Bevölkerung von 77.752 Einwohnerinnen (Stand: 2016) bei einer Fläche von 62 km² auf (Troisdorf, 2017). Der Stadtyp von Troisdorf ist große Mittelstadt, der Raumtyp ist überwiegend städtisch und der siedlungsstrukturelle Typ ist städtischer Kreis.

Die Stadt Troisdorf stellt ihren Bürgerinnen und Bürgern ein Klimaschutzportal online zur Verfügung (Troisdorf, 2018). Zusätzlich wurde ein Klimaschutzkonzept für die Stadt Troisdorf erarbeitet, welches auf den Energieverbrauch, die CO₂-Emissionen und die Nutzung erneuerbarer Energien eingeht. Im Rahmen dieses Konzeptes wurde eine

Klimaschutzmanagerin eingestellt, die Ansprechpartnerin für die Bürgerinnen und Bürger für Fragen, Ideen oder Anregungen zur Verfügung steht (Troisdorf, 2018).

4.2.6. Lüdenscheid

Lüdenscheid liegt in Nordrhein-Westfalens (NRW) ca. 100km von Köln entfernt und weist eine Bevölkerung von 74.770 Einwohnern (Stand: 31.07.2017) bei einer Fläche von 8.701 ha (Stand: 31.12.2016) auf. (Lüdenscheid, 2017a) Der Stadttyp von Lüdenscheid ist große Mittelstadt, der Raumtyp ist teilweise städtisch und der siedlungsstrukturelle Typ ist städtischer Kreis, Lüdenscheid gehört zum Märkischen Kreis.

Um eine Vorbildfunktion für die Bürgerinnen und Bürger einzunehmen, ist Lüdenscheid dem Klima-Bündnis – ein Netzwerk, dem insgesamt 1.700 Städte, Kreise und Gemeinden sowie Bundesländer und Provinzen, NGOs und andere Organisationen in ganz Europa angehören – beigetreten. Zudem möchte Lüdenscheid durch die Mitgliedschaft Maßnahmen zum Klimaschutz für den eigenen Gebäudebestand entwickeln und umsetzen. Darüber hinaus werden Klimaschutzprojekte wie Schülerprojekte gegen den Klimawandel, das Projekt ÖkoProfit sowie viele andere Initiativen unterstützt. Das Projekt ÖkoProfit ist ein Angebot, bei dem Betriebe jeglicher Größe Kosten senken und gleichzeitig die Umwelt entlasten können. (Lüdenscheid, 2017b)

4.2.7. Kolpingstadt Kerpen

Kerpen liegt in Nordrhein-Westfalen in der Nähe von Köln und weist eine Bevölkerung von 67.659 Einwohnerinnen (Stand: 31.12.2016) bei einer Fläche von 11.390 ha (Stand: 31.12.2016) auf (Kerpen, 2017a). Der Stadttyp von Kerpen ist große Mittelstadt, der Raumtyp ist überwiegend städtisch und der siedlungsstrukturelle Typ ist städtischer Kreis.

Die Stadt Kerpen wurde vom NRW-Umweltministerium mit dem European Energy Award ausgezeichnet (Kölner Stadt-Anzeiger, 2013). Darüber hinaus findet eine Bürgerbeteiligung zur Erstellung eines Klimaschutzkonzeptes statt. Hierbei werden gemeinsam Ideen und Vorschläge gesammelt, um ein zukunftsweisendes Klimaschutzgesetz zu erarbeiten (Kerpen, 2017b).

4.2.8. Grevenbroich

Grevenbroich liegt in Nordrhein-Westfalen im Städtedreieck Düsseldorf-Köln-Mönchengladbach und weist eine Bevölkerung von 62.122 Einwohnerinnen (Stand: 31.12.2017) bei einer Fläche von 103 km² (Stand: 31.12.2017) auf (Grevenbroich, 2017). Der Stadttyp von Grevenbroich ist große Mittelstadt, der Raumtyp ist überwiegend städtisch und der siedlungsstrukturelle Typ ist städtischer Kreis.

Die Stadt Grevenbroich stellt ihren Bürgerinnen und Bürgern ein Gründachpotentialkataster (Grevenbroich, 2018a) sowie ein Solarpotentialkataster online zur Verfügung (Grevenbroich, 2018b). Darüber hinaus findet eine Bürgerbeteiligung im Rahmen des Projektes „Integriertes Handlungskonzept Innenstadt Grevenbroich (ISEK)“ statt. Hierbei werden gemeinsam Ideen und Vorschläge gesammelt, um ein integriertes Handlungskonzept zu entwickeln (Grevenbroich, 2016).

4.2.9. Kleve

Kleve liegt in Nordrhein-Westfalen am unteren Niederrhein an der deutsch-niederländischen Grenze und weist eine Bevölkerung von 52.037 Einwohnerinnen (Stand: 31.12.2015) bei einer Fläche von 97,76 km² auf (Kleve, 2015). Der Stadttyp von Kleve ist kleine Mittelstadt, der Raumtyp ist überwiegend städtisch und der siedlungsstrukturelle Typ ist städtischer Kreis.

Die Stadt Kleve verfügt über einen Klimaschutzfahrplan, in dessen Rahmen verschiedene Klimaschutzprojekte durchgeführt werden, z.B. Sanierungen verschiedener Beleuchtungen (Kleve, 2018). Darüber hinaus findet eine Bürgerbeteiligung im Rahmen des Klimaschutzfahrplan statt. Hierbei werden gemeinsam Ideen und Vorschläge gesammelt, um ungenutzte Potentiale in den Bereichen Energieeinsparung, Energieeffizienz und erneuerbare Energien zu ermitteln, zu quantifizieren und zu nutzen (Kleve, 2018).

4.2.10. Herdecke

Herdecke liegt in Nordrhein-Westfalen an der Ruhr im nördlichen Ennepe-Ruhr-Kreis und weist eine Bevölkerung von 24.428 Einwohnerinnen bei einer Fläche von 22 km² auf (Herdecke, 2010; Stand: 31.12.2010). Der Stadttyp von Herdecke ist kleine

Mittelstadt, der Raumtyp ist überwiegend städtisch und der siedlungsstrukturelle Typ städtischer Kreis.

Die Stadt Herdecke verfolgt seit 1999 eine Lokale „Agenda 21“-Stelle, in welcher den Bürgerinnen und Bürgern sowie Unternehmen am Handlungsprogramm der Stadt für das 21. Jahrhundert mitarbeiten. Wesentlicher Bestandteil des Handlungsprogramms sind Klimaschutzaktivitäten. 2013 wurde ein Klimaschutzkonzept beschlossen, in dessen Rahmen ein Klimaschutzmanager für die konkrete Umsetzung eingestellt wurde (Herdecke, 2018).

4.2.11. Marsberg

Marsberg liegt in Nordrhein-Westfalen im nordöstlichen Teil des Sauerlands (Hochsauerlandkreis) und weist eine Bevölkerung von ca. 20.000 Einwohnerinnen bei einer Fläche von 182,22 km² auf (Marsberg, 2018a). Der Stadttyp von Marsberg ist große Kleinstadt, der Raumtyp ist ländlich und der siedlungsstrukturelle Typ ländlicher Kreis mit Verdichtungsansatz.

Die Stadt Marsberg stellt ihren Bürgerinnen und Bürgern einen Solarpotentialatlas online zur Verfügung (Marsberg, 2018c). Darüber hinaus nimmt die Stadt Marsberg an der nationalen Klimaschutzinitiative teil (Marsberg, 2018b). Hierbei werden Projekte im Bereich der Beleuchtungssanierung und dem Austausch von Heizungsanlagen durchgeführt (Marsberg, 2018b).

4.3. Analyse der Basisdaten: Strukturen der Städte

Tabelle 5 fasst verschiedene Kenndaten zur Gebäude- und Einwohnerstruktur der elf Städte, von NRW und von Deutschland zusammen. Alle elf Städte zeigen Unterschiede auf, die sie für die Grundgesamtheit relevant machen. Es sind Städte ausgewählt worden, die sich gerade durch die Anzahl an Einwohnern und die zugehörigen Einwohnerdichten unterscheiden.

Tabelle 5: Übersicht Basisdaten

Städte	Stadtkennzahlen		Stadtstruktur			Gebäudestruktur			Kennzahlen/Anteile	
	Einwohner	Einwohnerdichte	Gebietsfläche	Wohngebäudebestand (n)	Wohn-einheiten	Wohnfläche	Mittlere Wohnfläche pro Gebäude	Mittlere Wohnfläche pro WE	Alte Gebäude (p _{Bj} (Bj<1987))	Große Gebäude (p _{WE} (WE>6))
Einheit		1/km ²	km ²			m ²	m ²	m ²	%	%
Deutschland	80.219.695	225	357.008	18.922.618	40.545.317	3.724.961.176	197	92	73,9	5,8
Deutschland ¹	80.219.695	225	357.008	18.922.618	40.545.317	3.591.982.155	190	89	73,9	5,8
NRW	17.538.252	515	34.088	3.881.868	8.719.852	791.744.084	204	91	76,0	5,8
NRW ¹	17.538.252	515	34.088	3.881.868	8.719.851	766.704.574	198	88	76,0	5,8
Köln	1.005.775	2.482	405	137.725	539.785	43.058.240	313	80	81,3	19,5
Köln ¹	1.005.775	2.482	405	137.725	539.785	41.262.324	300	76	81,3	19,5
Düsseldorf	586.291	2.699	217	71.991	333.009	26.359.096	366	79	83,4	26,8
Düsseldorf ¹	586.291	2.699	217	71.991	333.009	24.950.897	347	75	83,4	26,8
Mönchengladbach	255.188	1.497	170	55.622	133.260	11.599.680	209	87	80,3	6,7
Mönchengladbach ¹	255.188	1.497	170	55.622	133.260	11.230.727	202	84	80,3	6,7
Arnsberg	74.384	385	193	18.334	37.554	3.437.201	187	92	78,0	3,0
Lüdenscheid	73.762	851	87	13.738	38.732	3.110.018	226	80	83,4	8,5
Troisdorf	72.408	1.165	62	16.475	34.385	3.094.795	188	90	74,3	4,6
Kerpen	63.273	556	114	16.099	29.730	2.710.863	168	91	72,1	4,3
Grevenbroich	61.741	602	103	16.341	29.221	2.773.930	170	95	76,0	2,7
Kleve	47.438	485	98	13.798	23.957	2.221.103	161	93	74,4	2,3
Herdecke	22.908	1.023	22	4.962	12.116	1.167.841	235	96	79,0	6,7
Marsberg	20.428	112	182	6.055	9.209	979.461	162	106	81,0	1,1
Summe Referenzstädte	2.283.596		1.654	371.140	1.220.958	100.512.229				
Summe Referenzstädte ¹	2.283.596		1.654	371.140	1.220.958	96.939.161				
Mittelwert Referenzstädte	207.600	1.078	150	33.740	110.996	9.137.475	217	90	78	8
Mittelwert Referenzstädte ¹	207.600	1.078	150	33.740	110.996	8.812.651	213	89	78	8

¹ Wohnflächenberechnung auf Basis von 10m²-Intervallen (siehe Abschnitt 3.2.2)

Die Stadt Köln ist mit 1.005.775 Einwohnern die größte Stadt, die betrachtet wird. Dabei ist die Einwohnerdichte mit 2.482 Einwohnern je km² in Köln geringer als in der zweitgrößten Stadt Düsseldorf mit 2.699 Einwohnern je km² und 586.291 Einwohnern. Die größten drei Mittelstädte Arnsberg, Lüdenscheid und Troisdorf liegen mit ihren 74.384, 73.762 und 72.408 Einwohnern nah beieinander. Jedoch weichen die Einwohnerdichten stark voneinander ab. Troisdorf hat von diesen drei Städten zwar die geringste Einwohnerzahl, aber mit 1164 Einwohnern je km² die höchste Einwohnerdichte.

Die Einwohner der elf betrachteten Städte machen in NRW 12% aus, auf Deutschland bezogen liegt der Anteil der Einwohner bei ca. 3%. Die Wohngebäude der elf Städte $n_{\text{Städte}}$ machen in NRW 13% aus und bezogen auf Deutschland 3%. Die Wohngebäude in NRW machen 20% der Wohngebäude in Deutschland aus.

Der Anteil der Gebäude, die vor 1987 erbaut wurden, p_{Bj} , beträgt in allen Städten zwischen 72% und 83%. Anders verhält es sich mit dem Anteil der Gebäude, die mehr als sechs Wohneinheiten aufweisen (p_{WE} ; in Tabelle 5 „große Gebäude“ genannt). Hier heben sich Düsseldorf und Köln mit mehr als 19% deutlich vom Rest der betrachteten Städte ab (1,1%-8,5%). Wie zu erwarten steigt mit p_{WE} die durchschnittliche Wohnfläche pro Gebäude. Gleichzeitig sinkt die durchschnittliche Wohnungsgröße, da größere Gebäude eher kleinere Wohnungen enthalten (vgl. Tabelle 2).

5. Ergebnisse

In Abschnitt 5.1 werden die ermittelten Gesamtpotentiale für die beteiligten Kommunen sowie für NRW und Deutschland zusammengefasst und die Ergebnisse nach den Methoden A und B miteinander verglichen. Eine nach Quartieren aufgeschlüsselte Potentialermittlung war aufgrund der Datenlage nur für wenige Kommunen möglich. Beispielhaft werden in Abschnitt 5.2 die Ergebnisse für die Stadtbezirke und –teile von Köln diskutiert. Unabhängig vom betrachteten Gebiet zeigen die Potentiale systematische Abhängigkeiten von der Zahl relevanter Gebäude, der Einwohnerdichte sowie dem Anteil relevanter Gebäude an deren Gesamtzahl. Diese Abhängigkeiten lassen sich mit einfachen mathematischen Funktionen als sogenannte Potentialkennlinien darstellen (Abschnitt 5.3), die dann eine schnelle Potentialabschätzung für weitere Kommunen in NRW und Deutschland erlauben.

5.1. Potential für dezentrale KWK

Tabelle 6 fasst die ermittelten Potentiale nach Anzahl der Gebäude und Heizenergiebedarf sowie diverse daraus abgeleitete Kenngrößen zusammen. Dabei werden jeweils die Ergebnisse der Methoden A und B gegenübergestellt. Die Tabelle ist von oben nach unten gegliedert in eine überregionale Betrachtung (NRW/Deutschland), Großstädte > 100.000 Einwohner und kleinere Städte sowie eine Zusammenfassung in Form von Summen oder Mittelwerten. Einige der Gesamtergebnisse ergeben sich wiederum aus einer Berechnung mit Hilfe dieser Summen oder Mittelwerte (letzte beide Zeilen).

Tabelle 6: Übersicht KWK-Potentiale

Potentialübersicht	Anzahl Gebäude mit Potential n_{KWK}		Abweichung B zu A	Anteil n_{KWK} am Gebäudebestand ($p_{n_{KWK},n}$)		Heizenergiebedarf mit Potential Q_{KWK}		Abweichung B zu A	Anteil n_{KWK} mit $>12WE$ an Q_{KWK}	Q_{KWK}/n_{KWK} (pro pot. Gebäude)		Q_{KWK}/n (pro Gebäude)		Q_{KWK}/A (pro Gebietsfläche)	
	A	B		%	A	B	A			B	%	A	A	B	MWh/a
Einheit			%	%		MWh/a		%		MWh/a		MWh/a		MWh/km ²	
Methodik	A	B		A	B	A	B		A	A	B			A	B
Deutschland ¹	662.046 ²			3,5		71.878.859			36	109		3,8		201	
Deutschland	662.046 ²			3,5		75.365.702			37	114		4,0		211	
NRW ¹	162.529 ²			4,2		17.045.692			31	105		4,4		500	
NRW	162.529 ²			4,2		17.770.020			31	109		4,6		521	
Köln ¹	20.286 ²	5.227 ³	-74	14,7	3,8	2.290.636	568.795	-75	36	113	109	16,6	4,1	5.654	1.404
Köln	20.286 ²			14,7		2.405.116			36	119		17,5		5.936	
Düsseldorf ¹	15.880 ²	3.210 ³	-80	22,1	4,5	1.709.540	496.206	-71	32	108	155	23,7	6,9	7.870	2.284
Düsseldorf	15.880 ²			22,1		1.820.111			33	115		25,3		8.379	
Mönchengladbach ¹	2.931 ²	2.981 ⁵	2	5,3	5,4	304.588	307.628	1	32	104	103	5,5	5,5	1.787	1.805
Mönchengladbach	2.931 ²			5,3		318.582			33	109		5,7		1.869	
Lüdenscheid	784 ⁴	970 ⁵	24	5,7	7,1	75.036	95.113	27	28	96	98	5,5	6,9	865	1.097
Troisdorf	480 ⁴	562 ⁵	17	2,9	3,4	49.071	58.390	19	35	102	104	3,0	3,5	789	939
Kerpen	439 ⁴	498 ⁵	13	2,7	3,1	52.889	58.799	11	45	120	118	3,3	3,7	464	516
Arnsberg	409 ⁴	433 ⁵	6	2,2	2,4	39.461	43.699	11	33	96	101	2,2	2,4	204	226
Herdecke	240 ⁴	263 ⁵	10	4,8	5,3	26.150	26.610	2	33	109	101	5,3	5,4	1.167	1.188
Grevenbroich	231 ⁴	337 ⁵	46	1,4	2,1	23.379	35.319	51	28	101	105	1,4	2,2	228	345
Kleve	192 ⁴	236 ⁵	23	1,4	1,7	16.296	22.335	37	11	85	95	1,2	1,6	167	228
Marsberg	50 ⁴	55 ⁵	10	0,8	0,9	4.567	5.331	17	27	91	97	0,8	0,9	25	29
Summe Städte ⁶	41.922	14.772				4.591.612	1.718.225								
Summe Städte ⁷	41.922					4.830.657									
Mittelwert Städte ⁶	3.811	1.343	0	5,8	3,6	417.419	156.202	3	31	102	108	6	4	1.747	915
Mittelwert Städte ⁷	3.811			5,8		439.151			31	104		6		1.827	

<i>pDE</i> ⁶	6%			6%									
<i>pDE</i> ⁷	6%			6%									
<i>pNRW</i> ⁶	26%			27%									
<i>pNRW</i> ⁷	26%			27%									
<i>Berechnet</i> ⁶		-65	11%	4%		-63	0	110	116	12	5	2.776	1.039
<i>Berechnet</i> ⁷			11%					115		13		2.921	

¹ Grundlage ist die 10m²-Intervall-Betrachtung der Wohnflächen (siehe Abschnitt 3.2.2)

² Anzahl der Gebäude mit Potential mit Ausschluss aller Gebäude mit Fernwärmeheizung (siehe Abschnitt 3.5.1)

³ Anzahl der Gebäude mit Potential mit Ausschluss der Stadtteile, in denen es eine Fernwärmeversorgung gibt (siehe Abschnitt 3.4;3.6)

⁴ Anzahl der Gebäude mit Potential mit Ausschluss der Gebäude mit Fernwärmeheizung über die Methode A.2 (siehe Abschnitt 3.5.2)

⁵ Keine Berücksichtigung von Gebäuden mit Fernwärmeheizung möglich.

⁶ Bei den Großstädten wird jeweils die mit „1“ markierte Variante berücksichtigt (10m²-Intervalle).

⁷ Bei den Großstädten wird jeweils die nicht mit „1“ markierte Variante berücksichtigt (20m²-Intervalle).

5.1.1. Anzahl der Gebäude mit Potential n_{KWK}

In den elf betrachteten Städten wurden mit Methode A 41.922 Gebäude mit Potential $n_{KWK,Städte}$ identifiziert, wobei hier Gebäude in Fernwärmegebieten nicht ausgenommen sind. Die Stadt Köln weist 48% der $n_{KWK,Städte}$ auf und die Stadt Düsseldorf 38%. Die durch Methode A ermittelte Anzahl der Gebäude mit Potential zeigt, dass der Anteil n_{KWK} am Gebäudebestand n ($p_{n_{KWK},n}$) steigt mit p_{WE} (vgl. Tabelle 5). Wie in Tabelle 6 aufgezeigt, heben sich $p_{n_{KWK},n}$ in Düsseldorf mit 22% und Köln mit 15% stark von denen der anderen Städte ab (0,8%-5,7%).

Der Anteil der Gebäude mit Potential der betrachteten Städte macht auf NRW bezogen 26% aus ($p_{KWK,n} = n_{KWK,Städte}/n_{KWK,NRW}$), obwohl der Anteil $n_{Städte}/n_{NRW}$ nur 13% an ausmacht (vgl. Abschnitt 4.3). Auf ganz Deutschland ($n_{KWK,DE}$) bezogen macht $n_{KWK,Städte}$ 6% aus, bei 3% Anteil von $n_{Städte}$ an n_{DE} . Die hohen Anteile von $n_{KWK,Städte}$ an $n_{KWK,NRW}$ bzw. $n_{KWK,DE}$ bestätigen zum einen die Auswahl der elf Städte (auch im Zusammenhang mit Abbildung 10). Zum anderen wird die Validität der im späteren Abschnitt 5.3 aufgeführten Potentialkennziffern bzw. -kennlinien untermauert.

Für die meisten Städte wird n_{KWK} bei der Verwendung der Methode A kleiner als bei Methode B. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch die direkte Merkmalsverknüpfung bei Methode A mehr Gebäude aus den Grenzen bezüglich des Baualters und der WE im Gebäude fallen als bei der Verwendung von statistischen Anteilen bei Methode B. Die Städte Düsseldorf und Köln bilden hier eine Ausnahme, da über die Methode B Stadtteile mit vorhandenem Fernwärmenetz identifiziert werden können. Diese Stadtteile gelten dann als ohne Potential und werden deshalb aus dem Gesamtergebnis herausgenommen. Die relativen Abweichungen der Methodik B bezogen auf A (=100%) liegen für die anderen Städte bei n_{KWK} zwischen 2% und 46%

Der Anteil der Gebäude mit Potential am gesamten Wohngebäudebestand $p_{n_{KWK},n}$ zeigt keine eindeutigen Abhängigkeiten von der Stadtgröße oder dem Anzahlpotential n_{KWK} der Stadt. Bis auf Ausnahmen mit geringer Abweichung steigt mit steigendem n_{KWK} aber der Heizenergiebedarf mit Potential pro Gebäude $Q_{KWK,n}$. Auf diese Korrelation wird in Abschnitt 5.3 näher eingegangen. Da der Anteil der alten Gebäude (älter als 1986) in jeder Stadt nahezu gleich ist (zwischen 70% und 80% gemäß

Abschnitt 4.3), kann der Anteil $p_{n_{KWK},n}$ als Kennzahl für die individuelle Gebäudestruktur einer Stadt verstanden werden, da er größtenteils durch die Anzahl der großen Gebäude (>6 WE) beeinflusst wird.

5.1.2. Heizenergiebedarf mit Potential $Q_{KWK,dez}$

Zuerst soll $Q_{KWK,dez}$ (folgend nur Q_{KWK}) eingeordnet werden. Von Eikmeier et al. (2011) wurde für die Stadt Düsseldorf ein KWK-Potential für Einzelobjektversorgung für Wohn- und Nichtwohngebäude in Höhe von 2.444 GWh/a ermittelt. Über die Methode A wurde für die Stadt Düsseldorf für Wohngebäude ein $Q_{KWK,dez}$ von 1.710 GWh/a bzw. 1.820 GWh/a bestimmt. Da in von Eikmeier et al. (2011) auch Nichtwohngebäude betrachtet wurden, ist die Abweichung von 27% als gering einzuschätzen und zeigt die Validität der Methode A.

In den Fällen, in denen für die Wohnflächenberechnung 10m²- Intervalle verwendet wurden, fällt Q_{KWK} kleiner aus als bei der 20m²-Betrachtung (vgl. Tabelle 6), da bei dieser das obere Randintervall höher liegt und somit potentiell mehr WE betrachtet werden (siehe Abschnitt 3.2.2).

Q_{KWK} fällt umso höher aus, je mehr n_{KWK} in der Stadt identifiziert wurden. Die einzige Ausnahme bildet die Stadt Kerpen, in der 41 n_{KWK} weniger als in Troisdorf identifiziert worden sind, der Q_{KWK} von Kerpen aber 3000 MWh höher ausfällt. Dies kann unter anderem auf den sehr hohen Anteil der Gebäude mit mehr als 12 WE am Q_{KWK} (45%) zurückgeführt werden (vgl. Tabelle 6). Für die meisten Städte liegt der Anteil dieser sehr großen Gebäude bei etwas einem Drittel.

Die Abweichungen der Methode B zu der Methode A (=100%) für Q_{KWK} entsprechen in etwa den Abweichungen bei n_{KWK} . Die geringen Abweichungen bzw. Ausnahmen sind auf den unterschiedlichen Abzug der Gebäude mit Fernwärmeheizung bei den kleineren Städten (Nicht-Großstädte) zurückzuführen.

5.1.3. Heizenergiebedarf pro Gebäude mit Potential $Q_{KWK,dez,n_{KWK}}$

Bei der Betrachtung des Heizenergiebedarfs pro Gebäude mit Potential $Q_{KWK,n_{KWK}}$ fällt auf, dass sich die Werte der elf Städte dicht um den Durchschnitt von NRW mit 105 bzw. 109 MWh/a und Deutschland mit 109 bzw. 114 MWh/a bewegen (vgl. Tabelle 6). Der Mittelwert über die elf Städte beträgt 102 MWh/a und der über die

Summen berechnete Wert 110 MWh/a. Die Differenz des höchsten $Q_{KWK,n_{KWK}}$ zum Mittelwert, gefunden in der Stadt Kerpen, beträgt 18 MWh/a oder +17%. Die Differenz des niedrigsten $Q_{KWK,n_{KWK}}$ zum Mittelwert (Stadt Kleve) beträgt -17 MWh/a oder -17%.

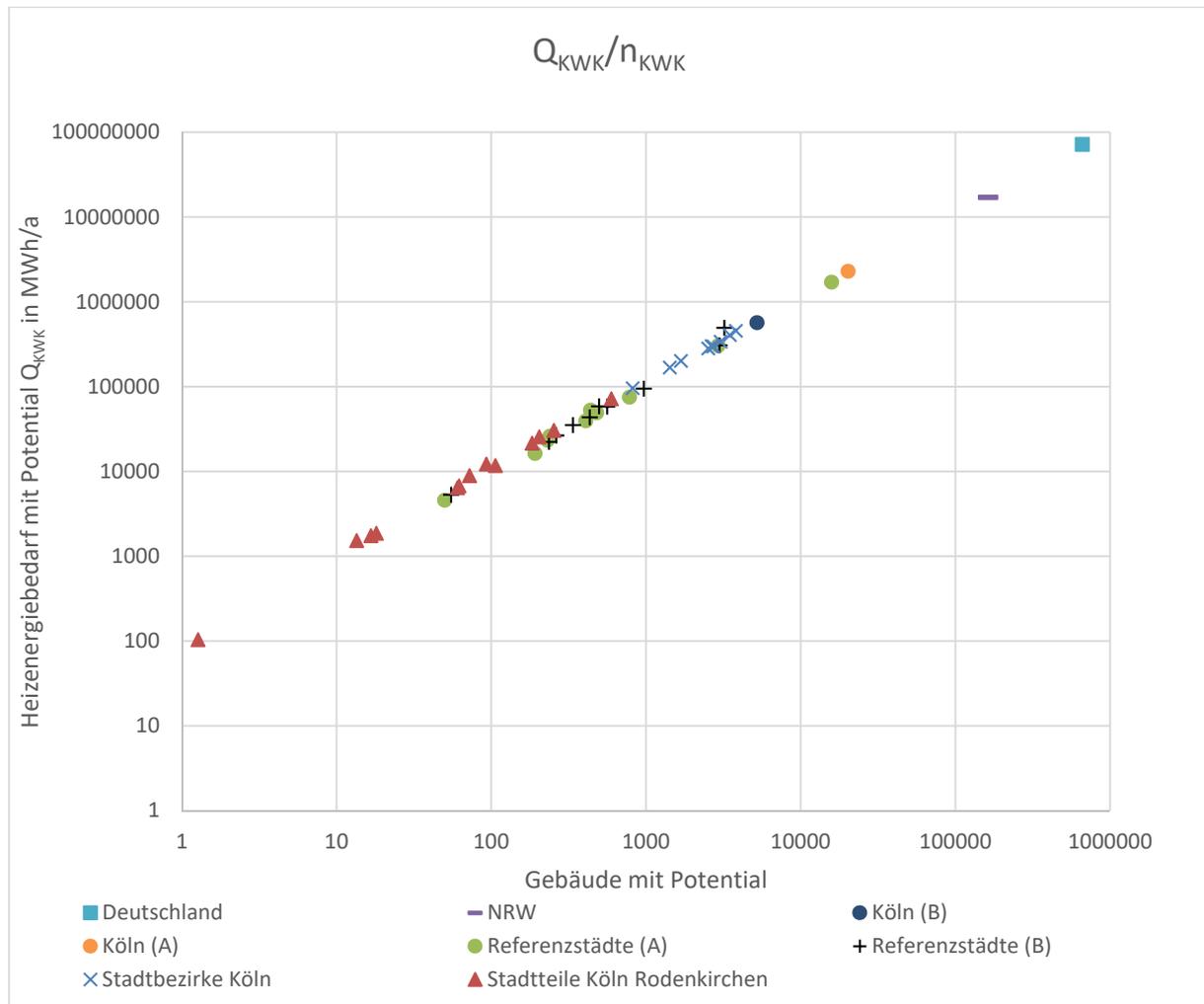


Abbildung 10: Kennlinie K1

Abbildung 10 zeigt einen nahezu linearen Zusammenhang zwischen $Q_{KWK,dez}$ und n_{KWK} . Dieser Zusammenhang lässt darauf schließen, dass sich die Gebäudegrößen der Gebäude mit Potential n_{KWK} sowie die Verteilung ihrer Baualter in allen Städten, Stadtbezirken und Stadtteilen sehr ähnlich sind. Die Anzahl der Gebäude mit Potential (n_{KWK}) hat also den größten Einfluss auf $Q_{KWK,dez}$.

5.2. Analyse von Stadtteilen und -bezirken am Beispiel Köln

Für die Analyse der Potentiale in den Stadtteilen konnte nur Methode B verwendet werden, da die Aufschlüsselung nach Stadtteilen in der Zensusdatenbank nicht verfügbar ist. Es werden auch Stadtteile aufgeführt, in denen es ein Fernwärmenetz gibt, um in den folgenden Abschnitten Zusammenhänge deutlicher darstellen zu können. Ein Abzug der Fernwärmegebiete hat nur Auswirkung auf das Gesamtergebnis (vgl. Tabelle 6).

Tabelle 7: Übersicht Stadtbezirke Köln, sortiert nach KWK-Anzahlpotential n_{KWK}

<i>Stadtbezirke</i>	n_{KWK}	$Q_{KWK,dez}$	$Q_{KWK,dez,n_{KWK}}$	$Q_{KWK,dez,n}$	n	$p_{n_{KWK},n}$
<i>Einheit</i>		MWh/a	MWh/a	MWh/a		%
<i>Innenstadt</i>	3.810	456.498	120	46	9.973	38
<i>Lindenthal</i>	3.481	406.756	117	20	19.970	17
<i>Mühlheim</i>	3.034	339.887	112	17	20.570	15
<i>Nippes</i>	2.727	298.588	109	24	12.629	22
<i>Ehrenfeld</i>	2.650	301.671	114	25	11.901	22
<i>Kalk</i>	2.522	282.962	112	20	13.900	18
<i>Rodenkirchen</i>	1.681	201.455	120	12	16.798	10
<i>Porz</i>	1.425	168.233	118	9	18.089	8
<i>Chorweiler</i>	819	96.324	118	7	13.893	6
<i>Summe</i>	22.150	2.552.374			137.723	
<i>Mittelwert</i>	2.461	283.597	116	20	15.303	17
<i>Berechnet</i>			115	19		16

Tabelle 8: Übersicht Stadtteile im Bezirk Köln-Rodenkirchen, sortiert nach KWK-Anzahlpotential n_{KWK}

<i>Stadtteil</i>	n_{KWK}	$Q_{KWK,dez}$	$Q_{KWK,dez,n_{KWK}}$	$Q_{KWK,dez,n}$	n	$p_{n_{KWK},n}$
<i>Einheit</i>		MWh/a	MWh/a	MWh/a		%
<i>Zollstock</i>	596	72.181	121	44	1.657	36
<i>Rodenkirchen</i>	253	30.628	121	10	3.025	8
<i>Bayenthal</i>	204	25.602	125	29	896	23
<i>Raderberg</i>	184	21.631	118	48	452	41
<i>Sürth</i>	106	11.750	110	5	2.191	5
<i>Marienburg</i>	93	12.232	132	14	862	11
<i>Raderthal</i>	72	8.940	124	11	824	9
<i>Rondorf</i>	62	6.783	110	3	2.403	3
<i>Weiß</i>	61	6.443	106	4	1.568	4
<i>Godorf</i>	18	1.873	104	3	577	3
<i>Meschenich</i>	17	1.753	105	1	1.189	1
<i>Immendorf</i>	13	1.535	114	3	447	3
<i>Hahnwald</i>	1	104	82	0	707	0
<i>Summe</i>	1.681	201.455			16.798	
<i>Mittelwert</i>		15.497	113	14		11
<i>Berechnet</i>			120	12		10

Wie in Tabelle 7 zu sehen ist, zeigen sich für die einzelnen Stadtbezirke der Stadt Köln zunächst ähnliche Proportionen bzw. Gesetzmäßigkeiten wie für Städte an sich (vgl. Abschnitt 5.1.3 und Abbildung 10). In Abbildung 10 ist zu erkennen, dass je mehr n_{KWK} vorhanden sind, desto größer ist auch der Q_{KWK} des Stadtteils. Bei kleineren Differenzen kommt es vereinzelt zu Ausnahmen, z.B. in den Stadtteilen Nippes und Ehrenfeld (Tabelle 7). Dies ist ein Indiz dafür, dass es innerhalb von Städten zu Konzentrationen von alten bzw. großen Gebäuden kommt. Mit Hilfe der nach Stadtteilen aufgeschlüsselten Zensusergebnisse lassen sich diese Konzentrationen identifizieren. Diese Konzentrationen von n_{KWK} an n sind in den betrachteten Städten, Stadtteilen und Stadtbezirken nicht ausreichend, um einen merklichen Einfluss auf die

Linearität in Abbildung 10 zu haben. Ein Indiz für die Konzentration von alten und großen Gebäuden ist der Heizenergiebedarf pro Gebäude ($Q_{KWK,n}$). Dieser ist auch ein Indiz dafür, ob in einem Stadtteil oder einer Stadt Q_{KWK} hoch oder niedrig sein wird. Tabelle 7 zeigt als höchsten Wert 46 MWh/a in der Innenstadt und als niedrigsten Wert 7 MWh/a in Chorweiler. Der Anteil potenziell interessanter Gebäude $p_{n_{KWK},n}$ des Stadtteils „Innenstadt“ beträgt 38%, in Chorweiler nur 6%. Erkennbar ist wieder, dass bei höherem $p_{n_{KWK},n}$ sowohl $Q_{KWK,n}$ als auch Q_{KWK} höher werden. Ausnahmen bilden hier die Stadtbezirke Lindenthal und Mühlheim, in denen Q_{KWK} höher ausfällt durch die deutlich höhere Anzahl an n_{KWK} . Werden die Stadtteile des Bezirks Köln-Rodenkirchen betrachtet, zeigt sich wieder die Korrelation von Q_{KWK} mit n_{KWK} (vgl. Abbildung 10). Im Bezirk Rodenkirchen stechen die Stadtteile Zollstock, Raderberg und Bayenthal besonders hervor, da in diesen eine sehr hohen Konzentration von n_{KWK} vorliegt. In den anderen Stadtteilen ist $p_{n_{KWK},n}$ deutlich niedriger (der nächsthöchste Wert ist 11% in Marienburg; vgl. Tabelle 8).

5.3. Potentialkennlinien

Es wurde versucht, auf Basis der vorstehenden Ergebnisse Verfahren zu entwickeln, über die ein KWK-Potential mit noch geringerem Aufwand identifiziert werden kann. Durch die Verknüpfung verschiedener Merkmale und Ergebnisse haben sich drei Kennlinien herauskristallisiert, durch deren Funktion ein Heizenergiebedarf mit Potential ermittelt werden kann.

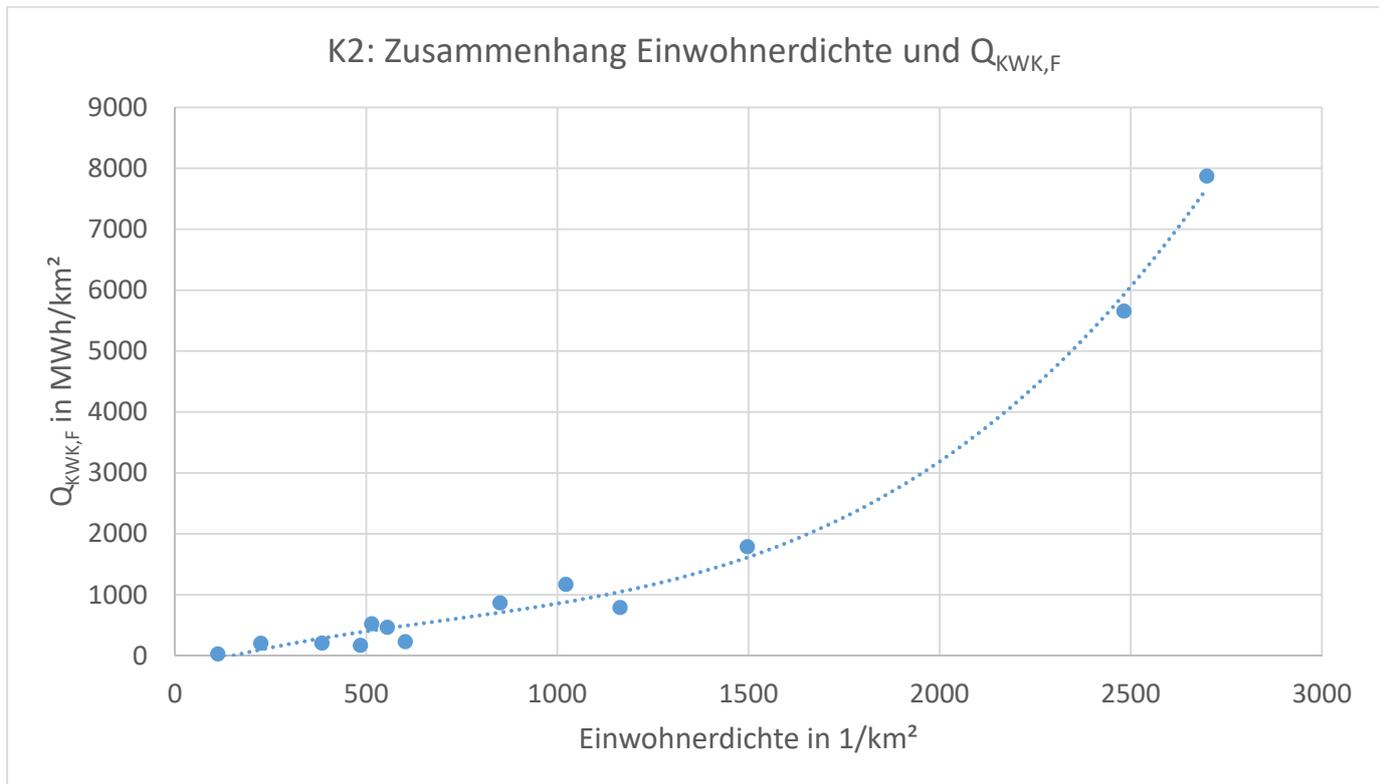


Abbildung 11: Kennlinie K2 - Zusammenhang Einwohnerdichte und flächenspezif. KWK-Potential $Q_{KWK,F}$

Bei der Kennlinie K1 werden die Gebäude mit Potential (n_{KWK}) in Relation zu dem Heizenergiebedarf mit Potential einer Stadt (Q_{KWK}) gesetzt. Es ergibt sich, wie schon zuvor festgestellt, ein linearer Verlauf, wie in Abbildung 10 zu sehen. Obwohl kleine Grundgesamtheiten verwendet werden, bilden sich klare Trends aus. Mit Hilfe von K1 lässt sich nur mit Hilfe von n_{KWK} auf Q_{KWK} schließen.

Wie in Abschnitt 5.1.3 festgestellt, bewegt sich $Q_{KWK,n_{KWK}}$ dicht um die Mittelwerte 105 bzw. 109 MWh/a. $Q_{KWK,n_{KWK}}$ kann deshalb als Kennziffer verwendet werden, um mit Hilfe von n_{KWK} ein Q_{KWK} zu ermitteln. Wird $Q_{KWK,n_{KWK}}$ als Kennziffer verwendet, bietet es sich an, das ermittelte Potential zusätzlich in zwei Szenarien mit der maximalen bzw. minimalen Abweichung von $a_{AB,n_{KWK}}$ (ca. +20% bzw. -20%, vgl. Abschnitt 5.1.3) zu berechnen. Daraus resultierend ergibt sich ein Zielkorridor, in dem sich der $Q_{KWK,n_{KWK}}$ bzw. Q_{KWK} bei einer detaillierteren Betrachtung bewegen sollte.

In der Kennlinie K2 wird der Zusammenhang zwischen dem Heizenergiebedarf mit Potential pro Gebietsfläche ($Q_{KWK,F}$) und der Einwohnerdichte aufgezeigt. Eine hohe

Einwohnerdichte korrespondiert mit einer höheren Anzahl größerer Gebäude und daher einem größeren KWK-Potential. Der zu erkennende Anstieg (vgl. Abbildung 11) lässt sich für die elf Städte, NRW und Deutschland durch ein Polynom dritten Grades beschreiben. Der Graph verlässt allerdings vor dem Ursprung den ersten Quadranten des Koordinatensystems, wodurch sich diese Kennlinie nur für Einwohnerdichten anwenden lässt, die größer 100 Einwohner pro km² sind. Für die Prognose eines Heizenergiebedarfs mit Potential über K2 wird ausschließlich die Einwohnerdichte benötigt. Um ein absolutes Ergebnis zu erhalten, wird zusätzlich die Fläche benötigt, auf die sich die Einwohnerdichte bezieht.

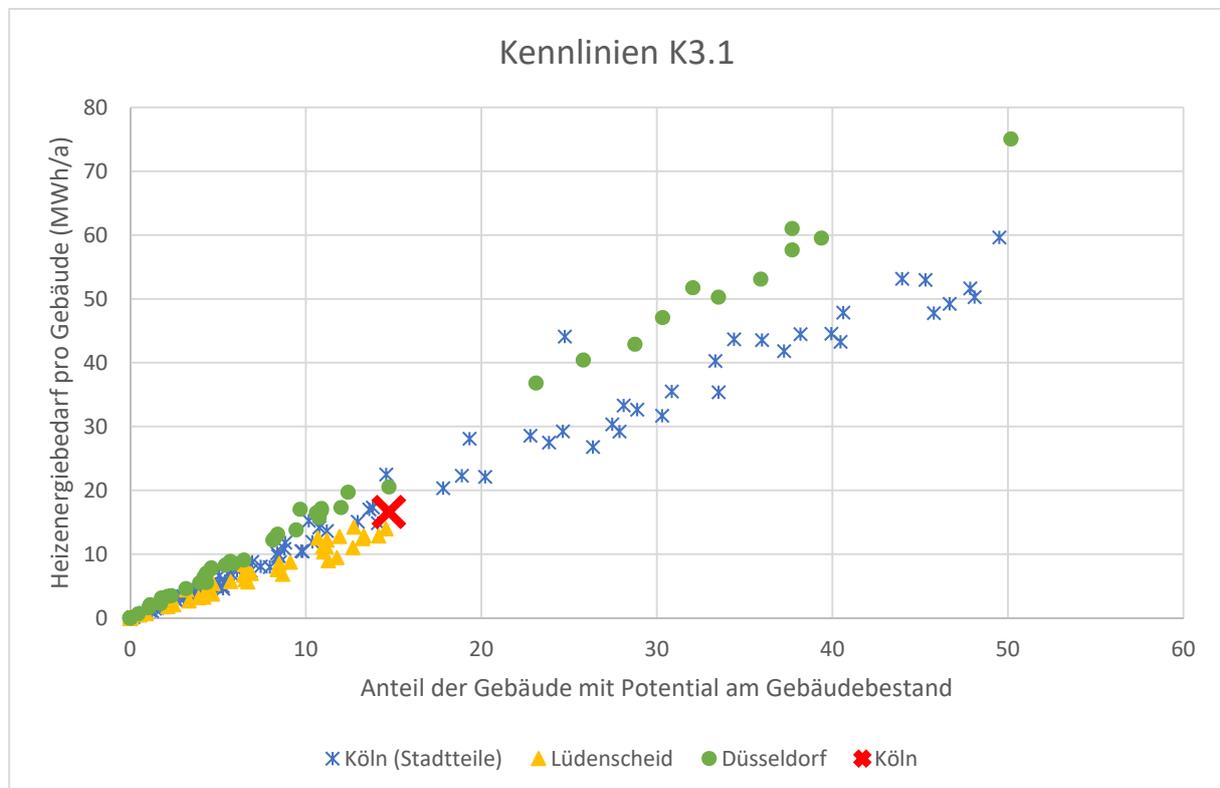


Abbildung 12: Kennlinien K3.1 - Zusammenhang des Heizenergiebedarfs pro Gebäude $Q_{KWK,n}$ zum Verhältnis n_{KWK} zu n ($p_{n_{KWK},n}$)

In Abbildung 12 ist der Zusammenhang des Heizenergiebedarfs pro Gebäude $Q_{KWK,n}$ zum Verhältnis n_{KWK} zu n ($p_{n_{KWK},n}$) dargestellt. Die jeweilige Grundgesamtheit wird durch die Stadtteile der Städte Köln, Düsseldorf und Lüdenscheid gebildet. Es sind deutlich lineare Zusammenhänge zu erkennen. Die Steigung variiert leicht zwischen den Städten. Auch bei der Anwendung auf die elf Städte zeigt sich dieser

Zusammenhang (vgl. Abbildung 13), trotz der kleinen Grundgesamtheit von elf Städten.

Für die vorgestellten Zusammenhänge der Kennlinien 1 und 3 werden lediglich die n_{KWK} und/oder n einer Stadt benötigt. Die n_{KWK} lassen sich mit der Methodik B sehr schnell und mit der Methodik A mit geringerem Aufwand ermitteln. Das auf diese Weise ermittelte Q_{KWK} kann dann als Grundlage für detailliertere Betrachtungen der Stadt verwendet werden.

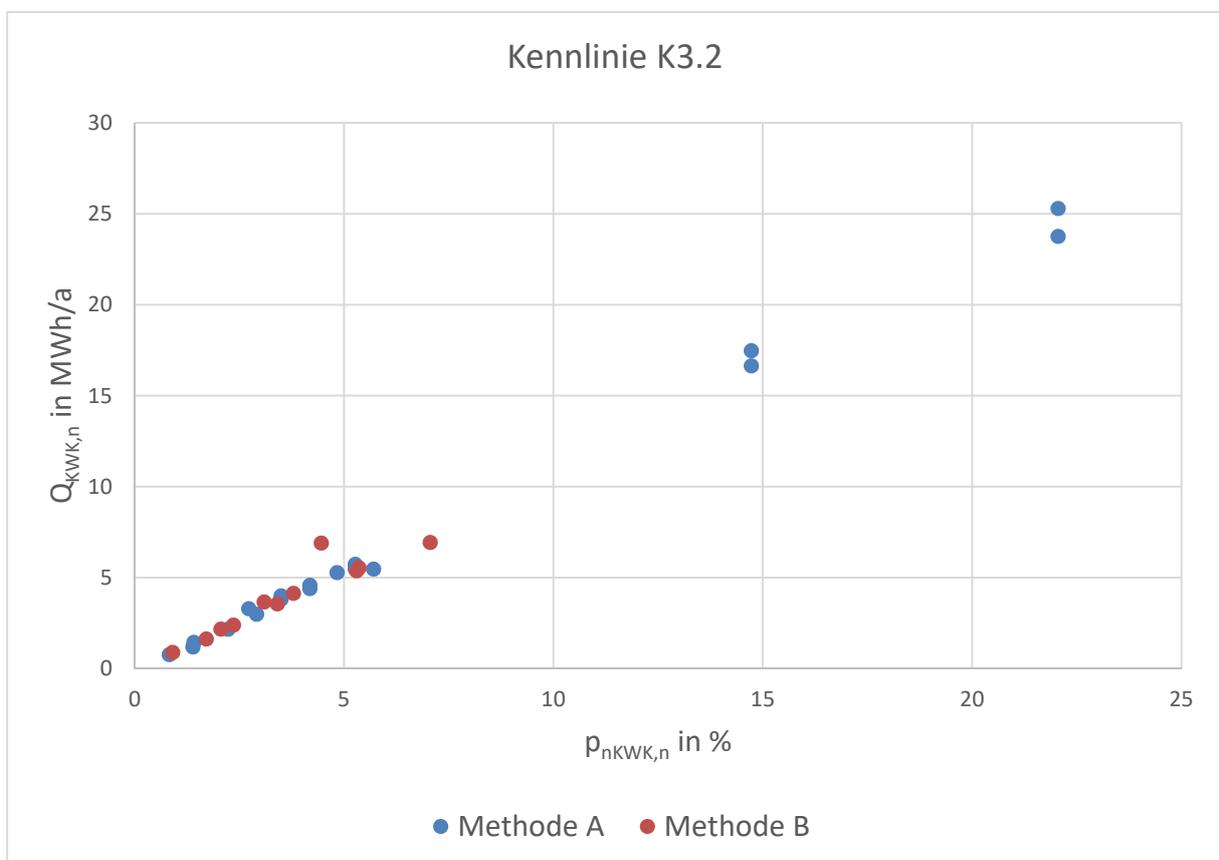


Abbildung 13: Kennlinie K3.2

6. Zusammenfassung

Im Förderprojekt KWK-Modellkommune Krefeld arbeiteten die Stadtwerke Krefeld SWK AG und das SWK E² – Institut für Energietechnik und Energiemanagement der Hochschule Niederrhein gemeinsam an der Integration von dezentralen KWK-Anlagen auf kommunaler Ebene. Solche Anlagen können Anwohnern, deren Wohngebäude nicht im Fernwärmeeinzugsgebiet liegen, eine KWK-Wärmeversorgung ermöglichen.

Der vorliegende Bericht gehört zur dritten und letzten Phase des Projektes – der Umsetzungsphase. In den ersten beiden Phasen wurde von den Stadtwerken Krefeld ein Konzept (KWK-Inno.Net Krefeld) und die zugehörigen Mess- und Steuerungssysteme zur Betriebsführung von dezentralen KWK-Anlagen innerhalb eines virtuellen Kraftwerks entwickelt. In der Umsetzungsphase wurden KWK-Anlagen in mehreren Krefelder Wohngebäuden und auch öffentlichen Gebäuden (z.B. Schwimmbädern) mit diesem System installiert und in Betrieb genommen.

Das SWK E² – Institut für Energietechnik und Energiemanagement hatte die KWK-Ausbaupotentiale in den unterschiedlichen Bezirken der Stadt Krefeld ermittelt, um geeignete Standorte für die Anlagen identifizieren zu können. Die hierfür entwickelte Methode (in diesem Bericht **Methode B** genannt) wurde in der letzten Projektphase auf Wohngebäude von elf Kommunen in NRW angewendet, um die Übertragbarkeit der Methode zu bewerten. Hierzu liegen für jede Kommune separate Berichte vor.

Eine Herausforderung bei der Potentialermittlung war dabei die deutlich unterschiedliche Datenlage in den Kommunen. Eine Aufschlüsselung nach Stadtteilen war nur für die Städte Köln, Düsseldorf und Lüdenscheid möglich. Verzichtet man auf die Stadtteilbetrachtung, können die verfügbaren Daten allerdings mit einer direkten Verknüpfung statistischer Merkmale in der Zensusdatenbank zuverlässiger und mit weniger Aufwand ausgewertet werden als mit Methode B. Im Rahmen der Erstellung des vorliegenden Gesamtberichtes wurde daher noch eine weitere **Methode A** entwickelt, die zusätzlich u.a. die Betrachtung aller Gebäude in NRW und in Deutschland erlaubt. Dafür ist mit Methode A eine nach Stadtteilen aufgeschlüsselte Betrachtung in der aktuellen Zensusdatenbank nicht möglich, eventuell aber in zukünftigen Erhebungen, wenn die Kommunen rechtzeitig aktiv werden (Zensus 2021).

Gemeinsam ist beiden Methoden, dass Gebäude mit relativ hohem Wärmebedarf gesucht werden; im Kern sind das größere und ältere Gebäude. Als Kriterien für den KWK-Ausbau wurden ein Grenzbaujahr und eine Mindestanzahl an Wohneinheiten innerhalb der Wohngebäude definiert. Basierend auf den verfügbaren Daten wurde das jüngste zu berücksichtigende Baujahr auf 1986 und eine Mindestanzahl von 7 Wohneinheiten festgelegt (für Köln und Düsseldorf musste je nach Methode davon leicht abgewichen werden).

Mit beiden Methoden wurden jeweils die Anzahl der Gebäude mit KWK-Ausbaupotential und die zugehörigen Wärmebedarfe (in Energieeinheiten pro Jahr) der Stadtteile bestimmt. Für die Stadt Düsseldorf ergeben sich ähnliche Potentiale wie nach Eikmeier et al. (2011); die Ergebnisse werden daher als valide eingeschätzt. Nach Methode A erfüllen in den elf untersuchten Städten 41.922 Gebäude die genannten Kriterien für eine KWK-Wärmeversorgung (zum Vergleich NRW: 162.529; Deutschland: 662.046). Das entsprechende Heizenergiepotential beträgt 4,6 TWh/a (NRW: 17 TWh/a, Deutschland: 72 TWh/a). Allerdings umfassen diese Zahlen auch Gebäude in Fernwärmegebieten.

Allgemein gilt, dass der Ausbau dezentraler KWK-Lösungen nur für die Quartiere interessant ist, in denen keine Fern- oder Nahwärmeversorgung vorliegt. Große, zentrale KWK-Anlagen arbeiten effizienter als kleine, dezentrale KWK-Anlagen. Damit unterstützen große KWK-Anlagen bereits die grundlegenden Ziele des Projektes, Reduzierung des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen.

Eine näherungsweise Berücksichtigung von Fernwärmegebieten ist aber nur möglich, wenn die Gebäudedaten nach Stadtteilen differenziert vorliegen. In diesem Projekt war das für die Städte Köln und Düsseldorf nach Methode B möglich; der Anteil für dezentrale KWK am Gesamtpotential liegt in diesen beiden Städten sowohl anzahlbezogen als auch energiebezogen bei ca. 20-25%.

Allerdings verfügen diese beiden Großstädte über eine vergleichsweise hohe Fernwärmeabdeckung (etwas über 7% des Gebäudebestandes). Für die anderen untersuchten, durchgängig kleineren Städte (Fernwärmeabdeckung 1,1-4,7%) wurden zwar bestehende Fernwärmeanschlüsse nach Methode A berücksichtigt, aber keine Fernwärmegebiete nach Methode B. Dann tritt der erwartete Effekt ein, dass das

Potential nach der (von der Systematik zu bevorzugenden) Methode A unter dem nach Methode B ermittelten liegt. In den meisten Kommunen liegt die Abweichung unter 20%, die maximale Abweichung ist in Grevenbroich mit 46% zu verzeichnen.

Legt man für die kleineren Städte eine im Mittel halb so große Fernwärmeabdeckung wie für Köln und Düsseldorf zugrunde, so müsste man nicht 75-80%, sondern unter 40% der KWK-fähigen Gebäude bestehenden Fernwärmegebieten zuschlagen. Für dezentrale Lösungen kämen nach dieser sehr groben Abschätzung also etwa 60% der identifizierten Gebäude in Frage.

Schließlich wurden im Rahmen des Projektes Kennzahlen für das Ausbaupotential berechnet, die sich auf unterschiedliche Merkmale beziehen. Dies ist zum einen das Ausbaupotential pro Gebäude, das sich über alle Betrachtungsebenen (Deutschland, NRW; Städte; Stadtteile) als recht konstant bei etwa 110MWh/a erweist. Zum anderen gibt es eine sichtbare Abhängigkeit von der Einwohnerdichte, da diese natürlich Rückschlüsse auf den Gebäudebestand insbesondere bezüglich großer Gebäude zulässt. Mit diesen beiden Kennzahlen wurden empirisch Kennlinien ermittelt, die für weitere Kommunen in Deutschland eine schnelle Abschätzung des KWK-Potentials ermöglichen.

Die vorgestellten Potentiale stellen grobe Abschätzungen dar. Betrachtet wurde der gesamte Heizwärmebedarf. Bei KWK-Lösungen wird aber für kalte Tage immer ein zusätzlicher Spitzenlastkessel benötigt, der einen Teil der Wärme bereitstellt. Eine Quantifizierung des Einflusses unterschiedlicher Auslegungen von KWK-Systemen erfolgt im Rahmen des Arbeitspaketes 3.5. Zudem können (und sollten) Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle den Wärmebedarf gegenüber den zugrunde gelegten Annahmen senken.

An anderer Stelle wurde das Ausbaupotential hingegen eher unterschätzt. Würde man den Energiebedarf zur Warmwasserbereitung einbeziehen, wäre das Potenzial in MWh/a etwas höher als berechnet. Zudem könnten durchaus auch Gebäude mit weniger als sieben Wohneinheiten für KWK-Lösungen interessant sein, z.B. indem man über ein Nahwärmenetz eine gemeinsame Versorgung für benachbarte Gebäude schafft.

7. Handlungsempfehlungen

1. DATENVERFÜGBARKEIT

- **Der bevorstehende Zensus 2021 stellt eine große Chance für alle Kommunen dar, um die Datenlage zum Gebäudebestand erheblich zu verbessern.** Potentialschätzungen und andere Planungen im Bereich Klimaschutz und Energie setzen verlässliche Daten voraus, die heute häufig gar nicht oder nicht digital verfügbar sind. Im Rahmen des Zensus 2021 sollten Kommunen alle Möglichkeiten nutzen, um detailliertere Daten über den Gebäudebestand anzufordern (z.B. Aufschlüsselung des Gebäudebestands nach Stadtteilen; Zeitintervalle orientiert am Inkrafttreten von Wärmeschutz- und Energieeinsparverordnungen) und **digital verfügbar zu machen.**
- Das betrifft auch die **Bauakten**, bei denen zumindest einige Basisdaten zu energieverbrauchsrelevanten Aspekten wie Zahl der Wohneinheiten, Baualter und Sanierungsstand für Potentialstudien und die Entwicklung von weitergehenden Handlungsempfehlungen hilfreich wären und **möglichst auch digital vorliegen sollten.**

2. AUSBAUPOTENTIAL FÜR DEZENTRALE KWK IN WOHNGBÄUDEN

- Deutschlandweit wird das KWK-Ausbaupotential auf insgesamt etwa 70 TWh/a Heizwärmebedarf in 660.000 Wohngebäuden geschätzt (NRW: 17 TWh/a in 162.000 Wohngebäuden). Da sich für alle betrachteten Gebietseinheiten (Bund, Land NRW, Kommunen verschiedenster Größen und Typologien) ähnliche spezifische Potenziale ergeben, wird vermutet, dass **in den meisten deutschen Kommunen ein relevantes Potential** existiert. Konkret beziffern lässt sich das mit verhältnismäßig geringem Aufwand auf Basis der Zensusdaten von 2011 und/oder unter Zuhilfenahme der in Abschnitt 5.3 diskutierten Korrelationen.
- **Für alle am Projekt beteiligten Kommunen** wurde das Potential zu 4,6TWh/a in ca. 42000 Gebäuden ermittelt. Konkrete **Handlungsempfehlungen finden sich in den jeweiligen Einzelberichten**, die 2018/2019 an die Ansprechpartner versandt

wurden. In acht Kommunen liegt das KWK-Ausbaupotential in Form eines Heizwärmebedarfs in MWh/a sowie der Zahl relevanter Gebäude aufgrund der Datenlage (siehe Punkt 1.) nur summarisch für die Gesamtstadt vor. Für konkrete weitere Schritte wäre eine Aufschlüsselung nach Stadtteilen hilfreich. In Ermangelung digitaler Daten wäre das im Abschnitt 3.7 beschriebene Vorgehen, bei dem gezielt nach einer ortskundigen und/oder luftbildbasierten Vorauswahl von Gebieten Bauakten gesichtet werden, eine Möglichkeit, bedeutet aber einen hohen Aufwand.

- Mögliche Maßnahmen nach der Einschätzung des KWK-Ausbaupotentials sind z.B. Kampagnen der Kommunen zur Förderung des KWK-Ausbaus mit dezentralen Lösungen bei Immobilienbesitzern, möglichen Investoren und Wohnungsgesellschaften in Stadtteilen mit hohem Potential.

8. Literaturverzeichnis

- AGFW, 2014: *AGFW-FW 309 Teil 1 FW 309 Teil 1 - Energetische Bewertung von Fernwärme - Bestimmung der spezifischen Primärenergiefaktoren für Fernwärmeversorgungs-systeme*, AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.
- Arnsberg, 2016: *Einwohner Haupt- und Nebenwohnsitz nach Stadtteilen* [Online] Available at: https://www.arnsberg.de/informationen/EWO_Entwicklung_2000_bis_2016_HWI_NWI_nach_Stadtteilen.pdf, Stand: 2016, abgerufen: Mai 2017, [Abgerufen im Mai 2017]
- Arnsberg, 2018: *Klimaschutz und Nachhaltigkeit*, [Online] Available at: <https://www.arnsberg.de/klima/index.php>, [Abgerufen am 09.05.2018]
- ASUE, 2010: *BHKW Grundlagen*, ASUE-ARBEITSGEMEINSCHAFT FÜR SPARSAMEN UND UMWELTFREUNDLICHEN ENERGIEVERBRAUCH e.V.
- ASUE, 2015: *BHKW-Fibel*, ASUE-ARBEITSGEMEINSCHAFT FÜR SPARSAMEN UND UMWELTFREUNDLICHEN ENERGIEVERBRAUCH e.V.
- BBSR, 2016: *Siedlungsstrukturelle Kreistypen 2014*, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, [Online] Available at: http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Raumbeobachtung/Raumabgrenzungen/Kreistypen4/KarteKreistypen.gif?__blob=poster&v=6, [Zugriff am 19. Mai 2017]
- BDEW, AG Energiebilanzen, 2016: *Ausgewählte Effizienzindikatoren zur Energiebilanz Deutschland - Daten für die Jahre 1990 – 2015*, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Arbeitsgruppe Energiebilanzen
- Blesl, M. et al., 2008: *Forschungsbericht FZKA-BWPLUS; Wärmetlas Baden-Württemberg - Erstellung eines Leitfadens und Umsetzung für Modellregionen*, Stuttgart: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart.

- Burgdorf, M. et al., 2012: *Raumabgrenzungen und Raumtypen des BBSR*, Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, ISBN: 978-3-87994-697-6
- Deutsche Bundesregierung, 2016: *Bundesregierung | Energie sparen durch Kraft-Wärme-Kopplung*. [Online] Available at: <https://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende/EnergieErzeugen/EnergieSparenKWK/node.html>, [Zugriff am 08 November 2016].
- DIN V 18599, 2011: *DIN V 18599 - Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung*, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin
- Drittenpreis, J. et al., 2012: *Energienutzungsplan unter besonderer Berücksichtigung des Denkmalschutzes am Beispiel der Stadt Iphofen*, TU München
- Düsseldorf, 2016: Landeshauptstadt Düsseldorf - Amt für Statistik und Wahlen - 12/2 Statistik- und Stadtforschung, April 2016
- Eikmeier, B. et al., 2011: *Potenzialerhebung von Kraft-Wärme-Kopplung in Nordrhein-Westfalen*, Bremen: Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
- Energieagentur.NRW, 2017: *Contracting für Wohngebäude*, [Online] Available at: http://www.energieagentur.nrw/energieeffizienz/contracting/contracting_fuer_wohngebaeude, [Zugriff im Dezember 2017]
- Grevenbroich, 2016: *Integriertes Handlungskonzept „Innenstadt Grevenbroich“*, [Online] Available at: https://www.grevenbroich.de/fileadmin/ISEK/PDF/ISEK-Grevenbroich_Fassung_09-2016.pdf, [Zugriff im Mai 2018]
- Grevenbroich, 2017: *Daten und Zahlen*, [Online] Available at: <https://www.grevenbroich.de/stadtportrait/daten-zahlen/>, [Zugriff im Mai 2018]
- Grevenbroich, 2018a: *Gründachpotentialkataster*, [Online] Available at: <http://www.solare-stadt.de/grevenbroich/Gruendachkataster>, [Zugriff im Mai 2018]

Grevenbroich, 2018b: *Solarpotenzialkataster*, [Online] Available at: <http://www.solare-stadt.de/grevenbroich/Solarpotenzialkataster>, [Zugriff im Mai 2018]

Herdecke, 2010: *Standort Herdecke*, [Online] Available at: <http://www.herdecke.de/wirtschaft-stadtplanung/wirtschaftsfoerderung/standort-herdecke.html>, [Abgerufen am 07. Mai 2018]

Herdecke, 2018: *Klimaschutz in Herdecke*, [Online] Available at: <http://www.herdecke.de/wirtschaft-stadtplanung/klimaschutz.html>, [Abgerufen am 07. Mai 2018]

Information und Technik Nordrhein-Westfalen, 2009: *Voraussetzungen für die Nutzung kleinräumiger Daten des Zensus 2011 – Handlungsleitfaden für Kommunen*, Information und Technik Nordrhein-Westfalen Geschäftsbereich Statistik, Düsseldorf, 2009

Kempe, S., 2014. *Räumlich detaillierte Potenzialanalyse der Fernwärmeversorgung in Deutschland mit einem hoch aufgelösten Energiesystemmodell*, Stuttgart: Insitut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwednung der Universität Stuttgart

Kerpen, 2017a: *Entwicklung der Bevölkerungszahlen*, [Online] Available at: <https://www.stadt-kerpen.de/index.phtml?La=1&sNavID=1708.34&mNavID=166.7&object=tx,1708.854.1&sub=0>, [Zugriff im Mai 2017]

Kerpen, 2017b: *Bürgerbeteiligung zum Klimaschutzkonzept geht mit den Workshops in die zweite Runde*, [Online] Available at: https://www.stadt-kerpen.de/media/custom/1708_10701_1.PDF?1503481453, [Zugriff im Dezember 2017]

Kleve, 2015: *Kleve in Kürze*, [Online] Available at: <https://www.kleve.de/de/inhalt/kleve-in-kuerze/>, [Abgerufen im Mai 2017]

Kleve, 2018: *Klimaschutz*, [Online] Available at: <https://kleve.de/de/inhalt/klimaschutz-4221314/>, [Abgerufen am 08.05.2018]

Köln, 2017: *Klimaschutz Community Köln*, [Online] Available at: www.stadt-koeln.de/politik-und-verwaltung/presse/klimaschutz-community-koeln, Stadt Köln, Amt für Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, [Zugriff am 26. März, 2018]

Köln, 2018a: *Rat bringt Beschlussvorlage zum Klimaschutz auf den Weg* [Online] Available at: www.stadt-koeln.de/politik-und-verwaltung/presse/rat-bringt-beschlussvorlage-zum-klimaschutz-auf-den-weg, Stadt Köln, 20. März 2018, [Zugriff am 26. März 2018]

Köln, 2018b: *Koordinationsstelle Klimaschutz*, [Online] Available at: www.stadt-koeln.de/service/adressen/koordinationsstelle-klimaschutz, Stadt Köln, [Zugriff am 26. März, 2018]

Kölner Stadt-Anzeiger, 2013: *Energiewende Land vergibt Umweltpreis an Kerpen*, [Online] Available at: <https://www.ksta.de/region/rhein-erft/kerpen/energiewende-land-vergibt-umweltpreis-an-kerpen-2577526>, [Zugriff im Dezember 2017]

Lüdenscheid, 2017a: *Stadt Lüdenscheid, Stabsstelle Demografie/Sozialplanung, Meldewesen*, Lüdenscheid, 2017

Lüdenscheid, 2017b: *Öko-Profit*, [Online] Available at: <http://www.luedenscheid.de/buerger/umwelt-natur/klimaschutz/117120100000060002.php>, [Zugriff im Dezember 2017]

Marsberg, 2018a: *Die Stadt Marsberg*, [Online] Available at: <https://www.marsberg.de/seite-174-0.html>, [Abgerufen am 09.05.2018]

Marsberg, 2018b: *Energiemanagement der Stadt Marsberg*, [Online] Available at: <https://www.marsberg.de/seite-738-0.html>, [Abgerufen am: 09.05.2018]

Marsberg, 2018c: *Energie und Umweltschutz* [Online] Available at: <https://www.marsberg.de/seite-634-0.html>, [Abgerufen am: 09.05.2018]

Mönchengladbach, 2018a: *Kurz & Knapp 2018*. [Online] Available at: http://www.mgmg.de/medien/PDF/Stadtinformationen/KurzUndKnapp2018_klein3.pdf, [Abgerufen am 08.05.2018]

Mönchengladbach, 2018b: *Klimaschutz in Mönchengladbach*. [Online] Available at: <https://www.moenchengladbach.de/de/rathaus/buergerinfo-a-z/planen-bauen-mobilitaet-umwelt-dezernat-vi/fachbereich-umwelt-64/klimaschutz/klimaschutz-in-moenchengladbach/>, [Abgerufen am 08.05.2018]

Pol, O., Shoshtari, S., 2010: *Projekt NACH ASPERN - Gesamtenergiekonzept*, Wien

- prognos, Fraunhofer IFAM, IREES, BHKW-Consult, 2014: *Potenzial- und Kosten-Nutzen-Analyse zu den Einsatzmöglichkeiten von Kraft-Wärme-Kopplung (Umsetzung der EU-Energieeffizienzrichtlinie) sowie Evaluierung des KWKG im Jahr 2014*. Berlin: bmwi
- RheinEnergie, 2014: *Energie & Klima 2020 – Statusbericht 2013-2014*, RheinEnergie AG, Köln
- RheinEnergie, 2016: *SmartCity Cologne*, [Online] Available at: www.smartcity-cologne.de/, RheinEnergie AG, Köln, [Zugriff am 26. März 2018].
- Städte- und Gemeindebund NRW, 2009: Städte- und Gemeindebund Nordrhein-Westfalen: Zensus 2011 und Nutzung kleinräumiger Zahlen, [Online] Available at: <https://www.kommunen-in-nrw.de/mitgliederbereich/mitteilungen/detailansicht/dokument/zensus-2011-nutzung-kleinraeumiger-daten.html?cHash=46751b7fe01eed2be3ff2d9a58986d4f>, [Zugriff im Mai 2018]
- Statistisches Bundesamt, 2014: *Zensus 2011*, [Online] Available at: https://www.zensus2011.de/DE/Home/home_node.html, [Zugriff am 1. August 2017]
- Statistisches Bundesamt, 2017a. *Privathaushalte: Energieverbrauch 2015*. [Online] Available at: https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltoekonomischeGesamtrechnungen/MaterialEnergiefluesse/Aktuell_Energieverbrauch.html, [Zugriff am 20. April 2017]
- Statistisches Bundesamt, 2017b. *Staat & Gesellschaft - Haushalt und Familie*. [Online] Available at: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/Bevoelkerung/HaushalteFamilien/Tabellen/VorausberechnungHaushalte.html>, [Zugriff am 20. April 2017]
- SWK, 2015: Pressekonferenz zur „KWK-Modellkommune Krefeld“, Stadtwerke Krefeld AG, Hochschule Niederrhein, Stadt Krefeld, Krefeld, 12.11.2015
- Troisdorf, 2017: *Einwohnerzahlen und Einwohnerstatistik Troisdorfs*, [Online] Available at: http://www.troisdorf.de/web/de/stadt_rathaus/Stadtportrait/statistik, [Abgerufen am 08.05.2018]

Troisdorf, 2018: *Klimaschutz*, [Online] Available at:
http://www.troisdorf.de/web/de/wirtschaft_bauen/Umwelt/klimaschutz/index.htm,
[Abgerufen am: 08.05.2018]