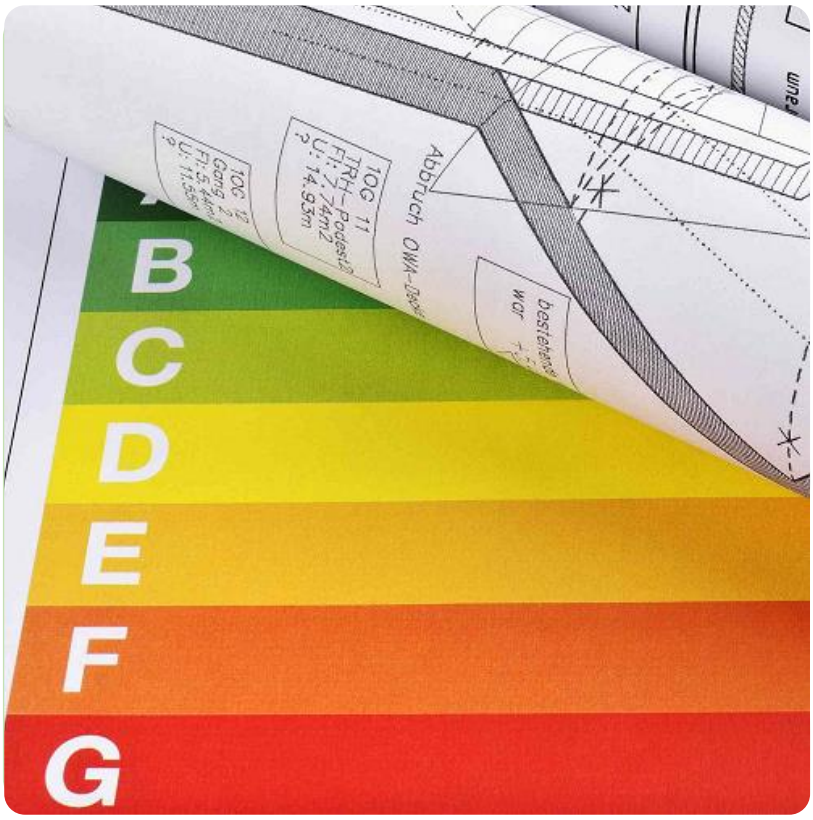
Energie mit Zukunft.
Umwelt und Verantwortung.

DBI

GWB-Klima

Auswirkungen des Klimawandels auf den regionalen Erdgasabsatz in Sachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt

Abschlussbericht



Inhalt

Abbildungsverzeichnis IV

Tabellenverzeichnis V

Formelzeichen-, Index- und Abkürzungsverzeichnis VI

1 Einleitung 1

2 Aktueller Wissensstand zum Klimawandel 2

3 Klimatisierungstechnologien für Wohngebäude 8

4 Berechnungsgrundlagen für die Modellierung 11

4.1 Charakterisierung der Datenbasis 11
4.2 Einflussparameter auf den Wärmebedarf von Wohngebäuden 11
4.2.1 Struktur des Wärmeenergieverbrauches im Wohnbereich 11
4.2.2 Einflussfaktoren auf den Raumwärmebedarf 12
4.2.3 Einflussfaktoren auf den Warmwasserbedarf 13

4.3 Einflussparameter auf den Kühlbedarf von Wohngebäuden 13
4.3.1 Struktur des Kühlenergieverbrauches im Wohnbereich 13
4.3.2 Äußere Kühllasten von Räumen 14
4.3.3 Innere Kühllasten von Räumen 14

5 Modellierung und Prognose der standortgenauen Wärme- und Kühlbedarfe in Wohngebäuden in Sachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt 15

5.1 Vorgehensweise zur Modellierung des Wärmebedarfes 15
5.1.1 Methodik zur Approximation des gegenwärtigen standortgenauen Wärmebedarfes 15
5.1.2 Methodik zur Approximation des zukünftigen standortgenauen Wärmebedarfes 16

5.2 Vorgehensweise zur Modellierung des Kühlbedarfes 17
5.3 Ergebnis der standortgenauen Wärme- und Kühlbedarfsmodellierung 19
5.3.1 Wärmebedarf 19
5.3.2 Kühlbedarf 22

6 Bestimmung standortgenauer Erdgasbedarfe in Wohngebäuden in Sachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt 25

6.1 Erdgasbedarf infolge des häuslichen Wärmebedarfes 25
6.1.1 Vorgehensweise zur Bestimmung des Erdgasbedarfes fürs Heizen 25
6.1.2 Ergebnisse 25

6.2 Erdgasbedarf infolge des häuslichen Kühlbedarfes 28
6.2.1 Vorgehensweise zur Bestimmung des Erdgasbedarfes fürs Kühlen 28
6.2.2 Ergebnisse 30

Inhalt

6.3 Auswertung und Gegenüberstellung des gesamtheitlichen häuslichen Erdgas- und Primärenergiebedarfes 33

6.3.1 Zusammenfassung der Erdgasbedarfe 33

6.3.2 Primärenergetische Evaluierung der Energiebedarfe 34

7 Fazit 38

Literaturverzeichnis 40

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Einflussfaktoren auf den Treibhauseffekt	3
Abbildung 2:	Anthropogener Antrieb auf den Klimawandel	4
Abbildung 3:	Temperaturverlauf in Deutschland	6
Abbildung 4:	Entwicklung der Jahresmitteltemperatur; Szenario A1B	7
Abbildung 5:	Systematisierung der Anlagentypen	8
Abbildung 6:	Beispiel einer Kälteversorgung mit Multisplitgerät und verschiedenen Innengeräten	9
Abbildung 7:	Ausgewählte Anlagen; Robur ACF	10
Abbildung 8:	Methodik zur Berechnung des Wärmebedarfes	15
Abbildung 9:	Variable Einflussfaktoren auf die Approximation des zukünftigen Wärmebedarfes	16
Abbildung 10:	Vorgehensweise zur Ermittlung der prognostizierten Gradtagszahlen	17
Abbildung 11:	Wärmerasterdarstellung im Untersuchungsgebiet	20
Abbildung 12:	Gegenüberstellung der prognostizierten Wärmebedarfe für 2030 und 2050 je Emissionsszenario	21
Abbildung 13:	Kühlrasterdarstellung im Untersuchungsgebiet je Emissionspfad	23
Abbildung 14:	Gegenüberstellung der prognostizierten Kühlbedarfe für 2030 und 2050 je Emissionsszenario	24
Abbildung 15:	Gegenwärtiger Erdgasbedarf (Heizen) auf Gemeindeebene	26
Abbildung 16:	Gegenüberstellung der prognostizierten Erdgasbedarfe (Heizen) für 2030 und 2050 je Emissionsszenario	27
Abbildung 17:	Technologieszenarien zur Bestimmung des Erdgasbedarfes (Kühlen) im Wohnsektor	28
Abbildung 18:	Gegenüberstellung der gegenwärtigen Erdgasbedarfe (Kühlen) für das optimistische Trend- bzw. Status Quo-Szenario	30
Abbildung 19:	Gegenüberstellung der szenarienabhängigen prognostizierten Erdgasbedarfe (Kühlen) für 2030 und 2050 für den Emissionspfad A1B	31
Abbildung 20:	Gegenüberstellung der szenarienabhängigen prognostizierten Erdgasbedarfe (Kühlen) für 2030 und 2050 für den Emissionspfad A2	32
Abbildung 21:	Aktueller und zukünftiger Erdgasbedarf für das Emissionsszenario A2	33
Abbildung 22:	Aktueller und zukünftiger Erdgasbedarf für das Emissionsszenario A1B	34
Abbildung 23:	Szenarienabhängige Primärenergiebedarfe zur Kühlung für den Emissionspfad A2	35
Abbildung 24:	Szenarienabhängige Primärenergiebedarfe zur Kühlung für den Emissionspfad A2	35
Abbildung 25:	Vergleich der eingesetzten Primärenergie für den Heiz- und Kühlfall im A2 Emissionspfad	36
Abbildung 26:	Vergleich der eingesetzten Primärenergie für den Heiz- und Kühlfall im A1B Emissionspfad	37

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Spezifischer Kühlbedarf der verschiedenen Gebäudetypen	18
Tabelle 2:	Clusterung der Wärmebelegung der einzelnen Raster	19
Tabelle 3:	Clusterung der Kühlbelegung der einzelnen Raster je Emissionspfad	22
Tabelle 4:	Bundeslandspezifische Entwicklung der erdgasversorgten Gebäude	25
Tabelle 5:	Klassifizierung der Kühllasten und Zuordnung der entsprechenden Anlagen	29

Formelzeichen-, Index- und Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
€	Euro
°C	Grad Celsius
a	Jahr
AKM	Absorptionskältemaschine
BBSR	Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
BHKW	Blockheizkraftwerk
CO_2	Kohlenstoffdioxid
d	Tage
d.h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung
DWD	Deutscher Wetterdienst
EFH	Ein- und Zweifamilienhaus / Ein- und Zweifamilienhäuser
EnEV	Energieeinsparverordnung
ggfs.	gegebenenfalls
GHD	Gewerbe-, Handel- und Dienstleistung
GIS	Geoinformationssystem
GTZ	Gradtagszahl
GWh	Gigawattstunden
h	Stunde(n)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
JAZ	Jahresarbeiszahl
K	Kelvin
kg	Kilogramm
KKM	Kompressionskältemaschine
km	Kilometer
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunden
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKK	Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung
m	Meter

m^2	Quadratmeter
m^3	Kubikmeter
MFH	Mehrfamilienhaus / Mehrfamilienhäuser
Mio.	Millionen
MPI	Max-Planck-Institut
MWh	Megawattstunden
PE	Primärenergie
PEF	Primärenergiefaktor
PJ	Petajoule
ppm	parts per million
RCP	Representative Concentration Pathways
REMO	Regionalmodell
RLT	Raumlufttechnik
SEER	Seasonal Energy Efficiency Ratio
SRES	Special Report on Emission Scenarios
TRY	Test Reference Years (Testreferenzjahre)
TWh	Terawattstunden
UBA	Umweltbundesamt
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vgl.	vergleiche
VRF	Variable Refrigerant Flow

1 Einleitung

Erdgas als Energieträger spielt in Deutschland seit Jahrzehnten eine bedeutende Rolle im Haushaltssektor. Zukünftig könnte die Bedeutung von Erdgas weiter steigen, etwa durch Ablösung von Stromerzeugungskapazitäten, die aktuell noch durch Kohle und Kernkraft gedeckt werden. Seine im Vergleich zu Kohle geringeren spezifischen CO_2-Emissionen sowie Zukunftslösungen wie grünes Methan aus Biomasse, Power-to-Gas oder Wasserstoffbeimischung ins Erdgasnetz sprechen weiterhin für Erdgas als Plattform- und Übergangslösung hin zu einem vollständig dekarbonisiertem Energiesystem. Für evidenzbasierte Entscheidungen über die zukünftige Verwendung bestimmter Energieträger wie Erdgas müssen daher möglichst alle Aspekte ihrer Nutzung beleuchtet, Entwicklungstendenzen untersucht werden. Im Vergleich zu den meisten anderen Energieträgern besitzt Erdgas die Besonderheit der Leitungsgebundenheit. Die Errichtung und der Unterhalt solcher Netze sind besonders kapitalintensiv. Einmal getroffene Investitionsentscheidungen in Netze sind zudem nicht oder nur unter sehr hohen volks- und betriebswirtschaftlichen Verlusten revidierbar. Aus diesen Gründen ist es notwendig, möglichst frühzeitig zukünftige Entwicklungen zu antizipieren und den Netzausbau der folgenden Jahre daran zu orientieren. Gleiches gilt für bestehende und zukünftige Absatzstrukturen.

Spätestens seit der Gründung des Weltklimarates (eng.: „Intergovernmental Panel on Climate Change“ (IPCC)) 1988 und der Veröffentlichung des ersten Sachstandsberichts 1990 sind die Effekte und Folgen eines Wandels des globalen Klimas durch menschliche Eingriffe in die Atmosphäre der Erde einer breiteren Öffentlichkeit bekannt. Diese klimatischen Änderungen wirken sich auf die energetische Versorgung von Wohngebäuden, da hiervon nicht nur der Heizbedarf sondern auch ein möglicher Kühlbedarf abhängt. Es ist davon auszugehen, dass diese Veränderungen nicht regional gleichmäßig verteilt auftreten werden. Vielmehr sind unterschiedliche lokale Auswirkungen auf den Heiz-, Warmwasser- und Kühlbedarf zu erwarten. In der vorliegenden Studie soll dies am Beispiel der Region Mitteldeutschland (Sachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen) untersucht werden. Während bereits diverse Veröffentlichungen die Auswirkungen auf den Heizenergiebedarf beschreiben, soll in dieser Arbeit insbesondere auch untersucht werden, welche Rolle erdgasbetriebene Klimatisierung zukünftig in Wohngebäuden spielen könnte.

Zielstellung der Studie ist es, einen Beitrag zur strategischen Planung des Erdgasabsatzes und Erdgasnetzes in der Region Mitteldeutschland zu leisten. Hierbei sollen dabei neben techno-ökonomischen Faktoren und demografischen Faktoren auch klimatische Entwicklungen betrachtet werden. Diese sind im Sinne der Zielvorgabe möglichst lokal hoch aufgelöst zu betrachten, um eine regionalisierte Planung zu ermöglichen.

2 Aktueller Wissensstand zum Klimawandel

Debatten um die Veränderungen im Klimasystem und des damit verbundenen Treibhauseffekts können aktuell in verschiedenen Medien verfolgt werden [1]. Dabei ist immer zu beachten, dass das Klimasystem sehr komplex und von verschiedenen Parametern abhängig ist. Zu den wesentlichen Bestandteilen des Klimasystems zählen die Atmosphäre, die Ozeane mit Meereis, Eisschilde mit Schelfeisen sowie Wasserflüsse und die Biosphäre [2]. All diese Komponenten stehen in Wechselwirkung zu- und miteinander. Impulsgeber für dieses Gleichgewicht ist die Sonne, deren kurz- und langwellige Strahlung zum Großteil von Atmosphäre und Wolken absorbiert wird. Die restliche solare Strahlung wird im Anschluss vom Erdboden absorbiert und in Form von Wärmestrahlung (langwellige Strahlung) zurück ins All emittiert [2]. Ein Großteil der langwelligen Strahlung wird jedoch an Stoffen wie Methan, Wasserdampf oder Kohlenstoffdioxid (CO_2), die sich in der Atmosphäre befinden, gebrochen und unter anderem erneut auf die Erdoberfläche reflektiert [3]. Nur durch diesen als Treibhauseffekt bezeichneten Prozess sind lebensfreundliche Bedingungen auf der Erde mit globalen Durchschnittstemperaturen von 15 °C möglich. Ohne diesen Effekt würden, obwohl sich die Erde in der habitablen Zone des Sonnensystems befindet, die globalen Temperaturen bei -18 °C liegen [4]. Die von der Sonne stammende Strahlung wird von den Landmassen und Ozeanen absorbiert und erwärmt diese. Aufgrund der unterschiedlichen geografischen Bedingungen und der verschiedenen Einstrahlungswinkel erfolgt ein erhöhter Energiegewinn in den tropischen Regionen entlang des Äquators [5]. Dennoch erfolgen diese Prozesse auf dem gesamten Planeten und sorgen für globale Klimaveränderungen.

Methan und Kohlenstoffdioxid gelangen sowohl natürlich, als auch durch anthropogene (menschliche) Prozesse in die Atmosphäre [6]. Zusätzlich sorgt der Mensch beispielsweise durch Rodung und Landwirtschaft für eine veränderte Oberflächenkonstellation [7]. Die realen Folgen dieser Veränderungen sind schwer abzuschätzen. Die Veränderungen sind von einer Kombination verschiedener Kriterien abhängig und beeinflussen sich gegenseitig [8]. Die Methanfreisetzung durch die tauenden Permafrostböden verstärkt diesen Effekt zusätzlich [5]. Aufgrund der höheren Temperaturen kann es zudem zu Folgeeffekte wie schmelzende Polkappen kommen, wodurch wiederum der Meeresspiegel ansteigt. Durch das Schmelzen der Polkappen verkleinern sich zusätzlich die weißen Eisflächen, welche besonders gut die solare Einstrahlung ins All reflektieren und somit eine weitere Aufheizung reduzieren [2]. Weitere schwer abschätzbare Folgen der Temperaturerhöhung sind die Veränderungen der Salzkonzentrationen im Meer und deren Folgen auf die Meereslebewesen sowie Meeresströmungen [9]. In Abbildung 1 wird schematisch diese Wechselwirkung der verschiedenen Parameter des Treibhauseffektes abgebildet. Das Schaubild zeigt die wichtigsten Einflussparameter und Mechanismen des Treibhauseffekts.

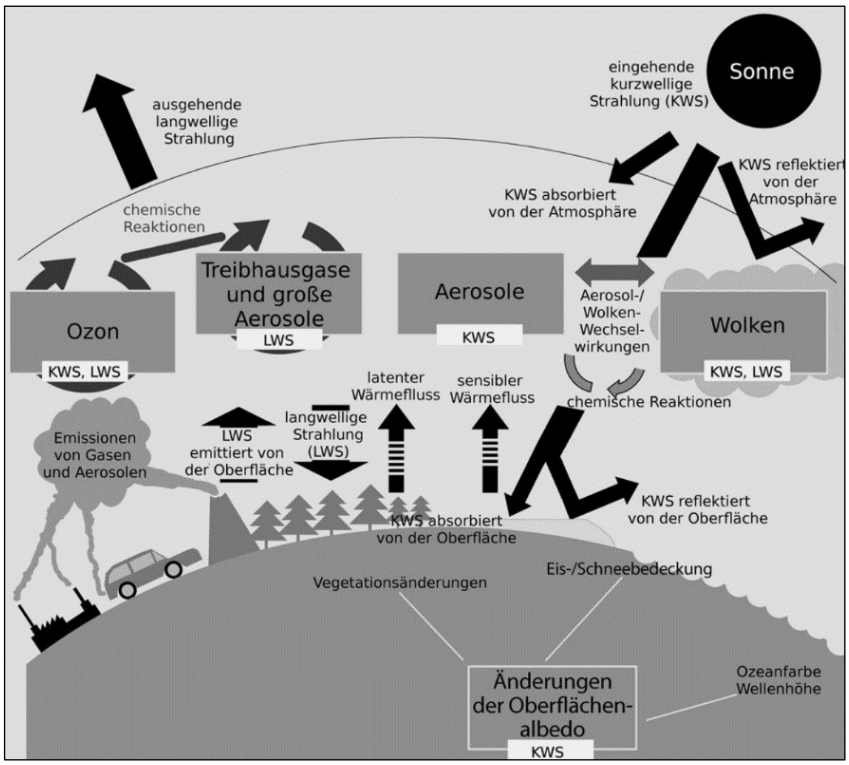


Abbildung 1: Einflussfaktoren auf den Treibhauseffekt [2]

Um die komplizierte Wechselwirkung der verschiedenen Parameter des Treibhauseffekts auszuwerten, wurden computerbasierte Modelle erstellt. In diese Modelle sind sowohl die bereits heute erkennbaren Erwärmungen als auch die Konzentrationen der Treibhausgase implementiert worden. Aktuelle Auswertungen zeigen einen Anstieg der globalen Mitteltemperatur [2]. Tendenziell ist außerdem eine Erwärmung der Ozeane anzunehmen [10]. Eine erste Einteilung erfolgt nach globalen und regionalen Modellen. Bei der Betrachtung der globalen Entwicklung basieren die Daten auf einem Atmosphärischen, Ozean-, Schnee-, Eis- und Vegetationsmodell. Anthropogene Einflüsse werden dabei entweder durch Annahmen zur Freisetzung von Treibhausgasen (SRES-Szenarien) oder in neueren Modellen auch anhand strahlungsgetriebener Prozesse (RCP-Szenarien) ergänzt [2]. Für beide Modelle existieren verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Annahmen.

Das SRES-Modell ist das Ursprungsmodell für die ersten Berichte des IPCC und bildet seit mehreren Jahren den Status quo der Klimamodelle. Bis 2100 wurden vom IPCC verschiedene Special Report on Emission Scenarios (SRES) entwickelt. Die Szenarien wurden selbstständig vom IPCC entwickelt und legen circa 40 verschiedene Modelle und Simulationen zu Grunde [11]. Dabei wurden vor allem sozioökonomische Annahmen berücksichtigt sowie der Einfluss des Menschen. Demnach sind technischer Fortschritt, Demografie und Umweltbewusstsein von zentraler Bedeutung. Globale Katastrophen, wie Weltkriege oder Wirtschaftskrisen, wurden für die Betrachtungen nicht berücksichtigt. Grundsätzlich sind die Szenarien in vier Kategorien eingeteilt [12].

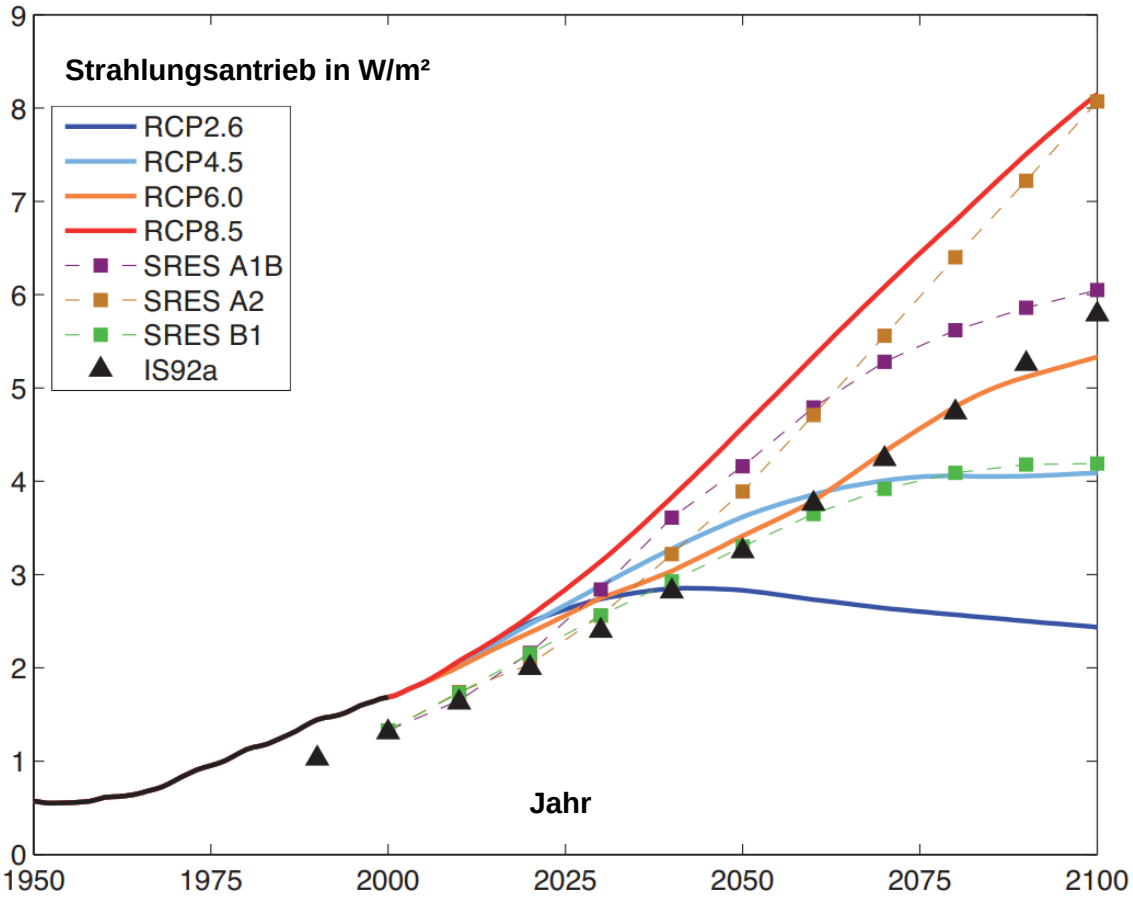


Abbildung 2: Anthropogener Antrieb auf den Klimawandel [13]

In den Szenarien A1 und B1 wird eine homogene globalisierte Entwicklung angenommen, wohingegen die Szenarien A2 und B2 auf regionale Unterschiede eingehen. A1 und B1 gehen außerdem von einem weiteren Bevölkerungsanstieg und einem starken Wirtschaftswachstum aus. Bis 2050 soll sich die Weltbevölkerung bei circa neun Milliarden Menschen stabilisieren. Zusätzlich werden neue Technologien mit geringeren Emissionen genutzt. Das Szenario A1 besitzt verschiedene Ausprägungen, welche unterschiedliche energiepolitische Merkmale aufweisen. In der Ausprägung A1FI wird überwiegend auf fossile Brennstoffe gesetzt, wohingegen in der Ausprägung A1T die Energieversorgung durch nicht fossile Brennstoffe gedeckt wird. Die in Abbildung 2 gezeigte Ausprägung A1B bildet den Kompromiss aus den beiden vorher genannten Möglichkeiten und setzt demnach zu gleichen Teilen auf fossile und nicht fossile Brennstoffe. Das Szenario B1 beinhaltet eine parallele ökonomische Entwicklung, analog Szenario A1, setzt jedoch den Fokus auf eine Welt mit einem stark ausgeprägten ökologischen Gedanken. So werden umweltpolitische und soziale Entscheidungen auf globaler Ebene getroffen. Die Szenarien A2 und B2 gehen von einer, wie eingangs erwähnt, eigenständigeren und regionaler geprägter globalen Entwicklung aus. Außerdem wächst die Bevölkerung weniger stark, aber dafür kontinuierlicher und ökonomische Entscheidungen werden vermehrt auf regionaler Ebene getroffen. Besonders das Szenario B2 geht von einem weniger starken technologischen Fortschritt und überwiegend lokalen bzw. regionalen Lösungen aus. Aufgrund dieser verschiedenen Annahmen und Merkmale, weisen die verschiedenen Szenarien auch unterschiedliche Temperaturverläufe auf. Dabei wird das B1-Szenario von den Autoren als eher unrealistisch beschrieben, da für dessen Umsetzung ein tiefgreifender Wertewandel in der Gesellschaft notwendig wäre. Für das Szenario B2 ist auch eher eine unrealistische Eintrittswahrscheinlichkeit

zu erwarten, da der technologische Fortschritt in Zukunft voraussichtlich eher zunehmen wird. Aufgrund dessen gilt das Szenario A1B als eher realistisch, da dort kein sofortiger Umstieg auf erneuerbare Energien erfolgt. Zwar steigt in allen beschriebenen Modellen die globale Mitteltemperatur an, der Anstieg fällt jedoch unterschiedlich stark aus. Bei Annahme des „Bestfalles“, d.h. von Szenario B1, würde die Temperatur zwischen 1,1 °C und 2,9 °C zunehmen. Wird in Zukunft jedoch der Fokus auf die Ökonomie anstatt auf die Umwelt gelegt, dann sind die Prognosen nach Szenario A1 durch deutlich höhere Temperaturanstiege gekennzeichnet. Der Anstieg beziffert sich auf einen Bereich von 1,4 °C bis 6,4 °C bis zum Jahr 2100.

Ab 2013 wurden die SRES durch aktualisierte und weiterentwickelte „Representative Concentration Pathways“ (RCP) ersetzt [14]. Im Gegensatz zu den SRE-Szenarien wurden die RCP-Szenarien von unabhängigen Wissenschaftlern und nicht vom IPCC direkt entwickelt. Der grundlegende Unterschied besteht darin, dass die RCPs die Strahlungs- und Treibhausgasentwicklung auf der Erde berücksichtigen und nicht, wie die SRES, ökologische und ökonomische Annahmen voraussetzen. Dadurch beziehen sich die neueren Pathways auf Literatur- und Auswertungsergebnisse. Die vier RCP Szenarien RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 und RCP 8.5 unterscheiden sich überwiegend in der Treibhausgaskonzentration und im Strahlungsantrieb [15]. Das Szenario RCP 8.5 beinhaltet dabei die höchste Treibhausgaskonzentration, den höchsten Strahlungsantrieb und dadurch den höchsten Temperaturanstieg bis 2100 von bis zu 4,8 °C im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter. Auch im RCP-Modell zeigen die Kontinente höhere Erwärmungen als die Ozeane.

Durch die aktuellen Modelle kann ein mittlerer Temperaturanstieg bis zum Ende des 21. Jahrhunderts von 1,4 °C bis 6,4 °C, im Vergleich zum Ende des 19. Jahrhunderts, prognostiziert werden. Problematisch scheinen globale Erwärmungen von mehr als zwei bis drei Grad Celsius zu sein, weshalb das 2 °C Ziel eingeführt wurde [8]. Deren Auswirkungen auf die Flora und Fauna der Erde können durch die Modelle nur bedingt abgebildet werden [16]. Neben den globalen Auswirkungen sind auch lokale Veränderungen festzustellen. So konnte nach den ersten Wetteranalysen von 1860 ein Anstieg der Durchschnittstemperatur in Deutschland von 1,3 °C gemessen werden [17]. Ebenfalls stieg die CO_2-Konzentration von 280 ppm auf 405 ppm an. Insgesamt könnte diese Kombination von Veränderungen für global und regional veränderte Wasserkreisläufe sorgen. So sind bereits erhöhte Niederschlagsmengen in Süddeutschland feststellbar. Ebenfalls fallen die Sommer in der Tendenz trockener aus. Diese Art von Klimaveränderungen werden in Regionalmodellen abgebildet.

Abbildung 3 zeigt den Verlauf der Durchschnittstemperaturen für die Jahre 1881 bis 2014. Neben konstant steigenden Mitteltemperaturen ist auch eine starke Häufung von Mitteltemperaturen über 9,5 °C festzustellen. So sind zwölf der dreizehn Extrema und demnach die heißesten Jahre seit Beginn der Aufzeichnungen nach 1989 zu sehen. Demnach zählen die letzten 15 Jahre zu den heißesten jemals gemessenen. Zu den Folgen gehören sowohl ein Anstieg der Tage mit über 30 °C, als auch ein deutlicher Anstieg der Tage mit über 25 °C [17]. Im Gegensatz dazu nehmen die winterlichen Eis- und Frosttage ab. Gleichermaßen nehmen die sommerliche Trockenzeit und winterliche Überschwemmungen zu. Seit den 1960er Jahren haben die Niederschläge im Winter um circa 26 % zugenommen [2].

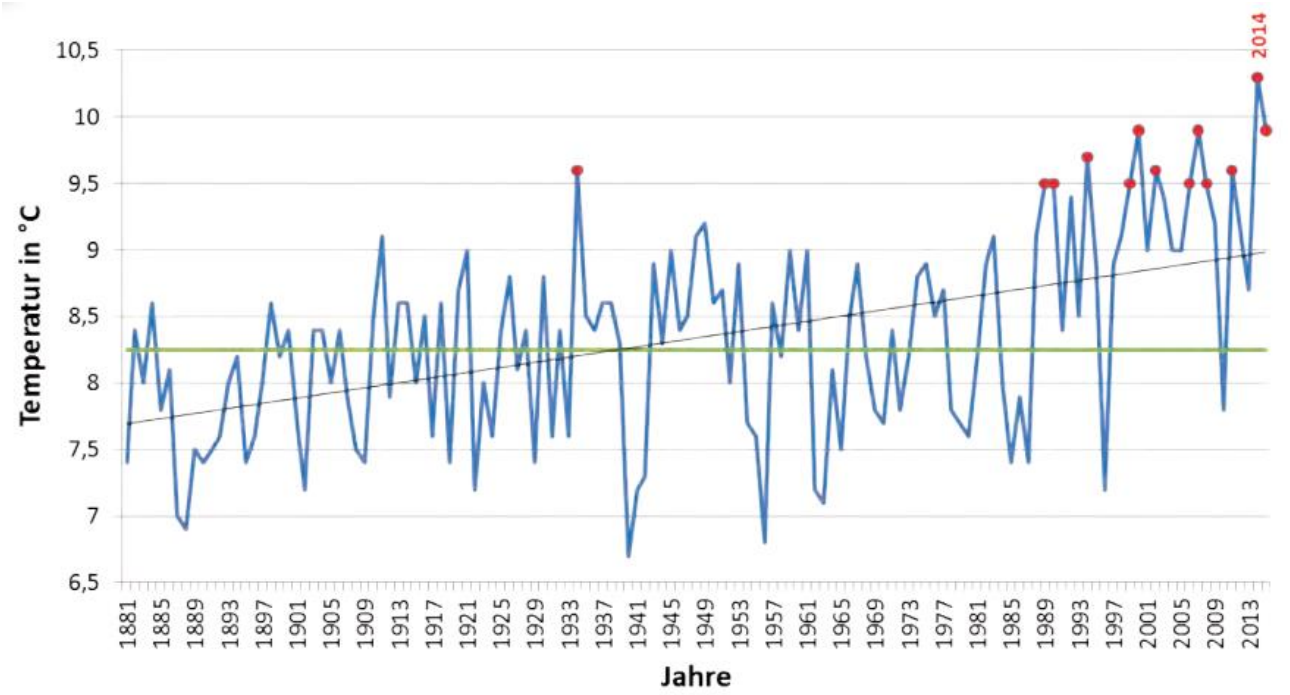


Abbildung 3: Temperaturverlauf in Deutschland [17]

Für einen ersten Überblick der Thematik werden die klimatischen Veränderungen mit Daten des Umweltbundesamtes (UBA) [18], in Karten für Deutschland visualisiert. Die Grundlage der Visualisierungen bildet dabei das Szenario A1B, welches ein mehr homogenes und strengeres Vorgehen der Staaten gegen die klimatischen Veränderungen vorsieht. Dabei beginnt die Klimasimulation 2001 und endet 2100. Das Betrachtungsende für die Untersuchungen im späteren Vorgehen bildet das Jahr 2050 ab.

Abbildung 4 zeigt exemplarisch die Entwicklung der Mitteltemperaturen für Deutschland in den Jahren 2001, 2020, 2050 und 2100. Insgesamt ist ein Anstieg der Temperaturen erkennbar, wobei es jedoch starke regionale Unterschiede gibt. So erwärmt sich bspw. die Region im Erzgebirge zum Teil weniger stark als der bundesweite Durchschnitt. Auf der anderen Seite erwärmt sich das Rheingebiet deutlich mehr als der bundesweite Durchschnitt. Besonders hervorzuheben ist zusätzlich die Temperaturentwicklung der Alpenregion. So sind bis 2050 noch Gebiete mit negativen Jahresmitteltemperaturen erkennbar, welche jedoch bis 2100 laut Prognose ganz verschwunden sind. Diese Entwicklung wäre mit Sicht auf den Gletscher- und Schneeverlauf womöglich, neben der tendenziellen Erwärmung, besonders kritisch.

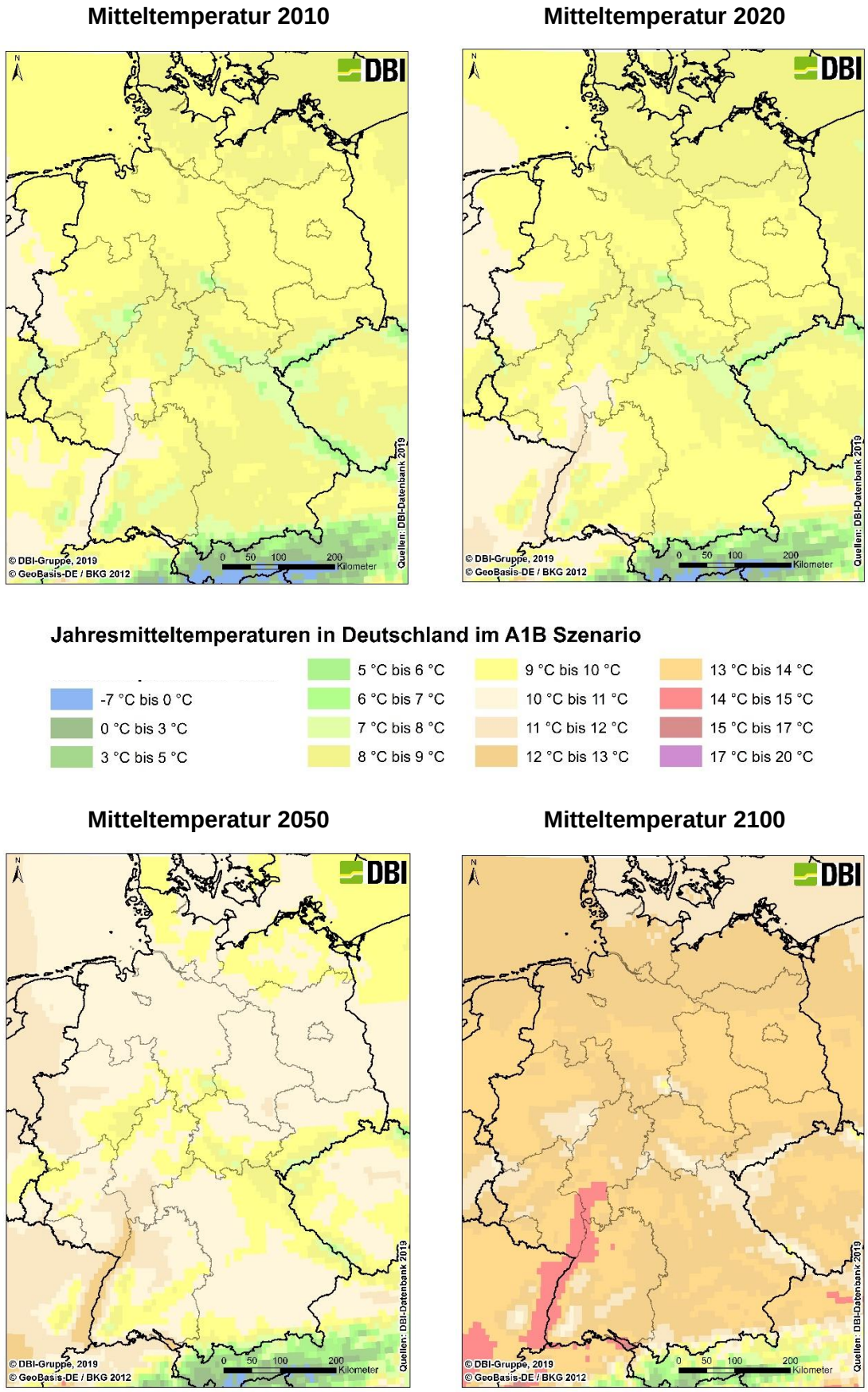


Abbildung 4: Entwicklung der Jahresmitteltemperatur; Szenario A1B [eigene Darstellung nach [18]]

3 Klimatisierungstechnologien für Wohngebäude

Für die Gebäudeklimatisierung haben sich am Markt aktuell zwei Anlagentypen durchgesetzt: elektrisch angetriebene Kompressionsmaschinen und thermisch angetriebene Sorptionsmaschinen. Dabei dominiert die elektrische Kompressionstechnik mit einem Marktanteil von über 90 % [19]. Konkret betrug der Gebäudeenergiebedarf für Klimakälte im Jahr 2011 im Gewerbe-, Handels-, Dienstleistungs- und Industriesektor ca. 8,7 TWh/a. Davon werden 8 TWh/a strombasiert und nur 0,7 TWh/a gasbasiert gedeckt [20].

Ein Grund dafür ist das angebotene breite Spektrum an elektrisch betriebenen Produkten und die vergleichsweise günstigen Investitionskosten für kleinere Anlagen. So bieten strombasierte Kompressionsmaschinen neben zentralen auch dezentrale Lösungen in vielfältigen Formen an. Folglich gibt es verschiedenste Produkte für Wohngebäude wie auch Nicht-Wohngebäude. Ab- und Adsorptionsmaschinen hingegen sind gegenwärtig nicht in der Lage, Lösungen für dezentrale Einsatzgebiete (Einfamilienhaus, kleinere Mehrfamilienhäuser) mit kleinen Leistungsklassen zu wettbewerbsfähigen Preisen anzubieten. Die auf dem Markt verfügbaren Leistungsklassen sind für den alltäglichen Gebrauch im Wohnsektor überdimensioniert. Somit findet ihre Einsatzmöglichkeit vorrangig bei Nicht-Wohngebäuden Anwendung. Aufgrund dessen ist das Angebot gasbasierter Geräte zur Raumkühlung von Wohngebäuden äußerst begrenzt. In Abbildung 5 wird gezeigt, welche Anlagentypen zur Raumkühlung eingesetzt werden können. Dabei wird nach zentralen und dezentralen Systemlösungen unterschieden sowie dem Medium, welches die Kälte überträgt.

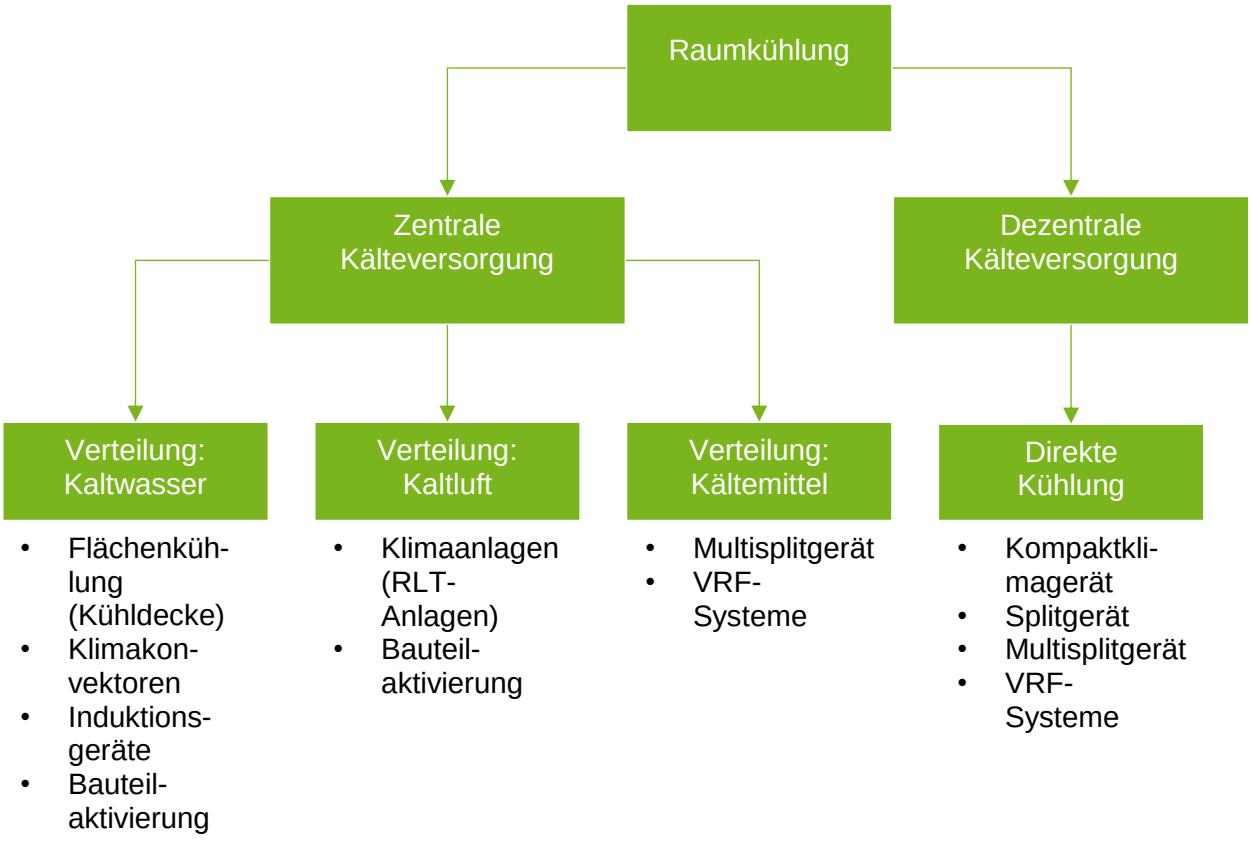


Abbildung 5: Systematisierung der Anlagentypen [eigene Darstellung nach [21]]

Dezentrale Kühlsysteme kühlen einen Raum direkt mit kalter Luft. Sie können bereits zu einem geringen Preis als kompakte und bewegliche Einheit gekauft werden. Infolgedessen sind sie sehr einfach aufzustellen und zu betreiben. Im Haushaltsbereich ist dies die am meisten verbreitete Kühltechnologie [20]. Der Bestand dieser beweglichen Monoblockgeräte betrug im Jahr 2015 über 770.000 Stück im deutschen Wohnungsbereich. Für das Jahr 2030 wird ein Bestand von knapp über 900.000 Stück prognostiziert [22]. Bei Splitgeräten sind die Komponenten in zwei Geräte aufgeteilt. Ein Teil wird an der Außenwand des Gebäudes montiert, der andere an der Innenwand. Die Anzahl der installierten Splitklimageräte hat sich in den letzten Jahren stetig vergrößert. Für das Jahr 2030 werden ca. 45.000 Anlagen dieses Typs prognostiziert [22]. Multisplitgeräte und VRF-Systeme weisen zu einem Außenteil mehrere Innenteile auf. [20] VRF ist die Abkürzung für Variable Refrigerant Flow. Übersetzt bedeutet dies: Variabler Kältemittelmassenstrom. Somit können VRF-Systeme den Kältemittelstrom variabel regulieren. Das garantiert ein spezifisches Kühlen der Räume und führt somit zu einem wirtschaftlicheren Betrieb.

Insgesamt wird ausgehend vom Jahr 2020 bis 2030 mit einer Zunahme dezentraler Lösungen um ca. 250.000 Geräte in Deutschland gerechnet. Deren durchschnittliche Leistung beträgt derzeitig ca. 4,7 kW. [20] Zudem zeichnet sich ein Trend hin zu reversiblen Systemen ab. Das bedeutet, die Geräte sind in der Lage zu kühlen und zu heizen.

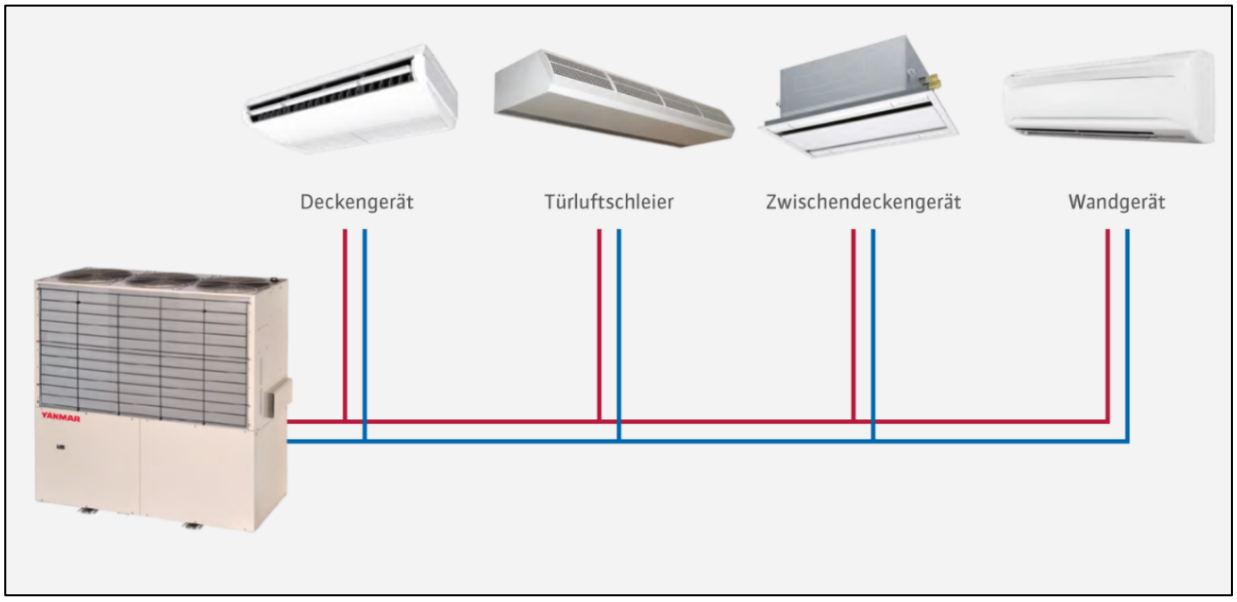


Abbildung 6: Beispiel einer Kälteversorgung mit Multisplitgerät und verschiedenen Innengeräten [21]

Zur Modellierung späterer Erdgasbedarfe werden repräsentativ für den Wohnsektor erdgasbetriebene Referenzanlagen zur Gebäudekühlung ausgewählt. Gasbasierte Kältemaschinen bedienen im Wohnsektor jedoch nur eine Nische. Folglich gestaltet sich die Suche schwierig und die Auswahl geeigneter Anlagen ist überschaubar. Es wurden keine am Markt verfügbaren gasbetriebenen dezentralen Kälteversorgungssysteme gefunden. Bei den Referenzanlagen handelt es sich demnach um zentrale Systeme. Auf Basis der recherchierten Nennleistung und des Nennverbrauchs an Erdgas der Anlagen werden diese den Gebäudekategorien zugeordnet. Dies ist notwendig, um einen zukünftigen Erdgasbedarf zu bestimmen. Dabei wird eine Maschine der Kategorie Ein- und Zweifamilienhäuser repräsentativ zugeordnet und eine andere Anlage der Kategorie Mehrfamilienhäuser. Das methodische Vorgehen zur Bestimmung der Erdgasbedarfe wird im Kapitel 6.2 näher erläutert.

Für die Kategorie Ein- und Zweifamilienhäuser fiel die Entscheidung auf eine Anlage der Firma Ro-

bur. Die begründet sich dahingehend, dass die Firma einer der führenden Anbieter bei erdgasbetriebenen Klimatisierungslösungen ist. Die Anlage GA ACF ist eine Absorptionskältemaschine. Die Spezifikationen weisen eine Nennleistung von 13,3 kW bis 17,7 kW bei einem Gasverbrauch von 2,68 $\frac{m^3}{h}$ auf [23]. Bei diesem Leistungsspektrum ist der Anlagentyp sogar in der Lage große Gebäude wie Mehrfamilienhäuser zu kühlen. Repräsentativ für Mehrfamilienhäuser wird die Anlage ENCP 450 J-R von der Firma YANMAR ausgewählt. Ein Grund dafür ist zum Bespiel die bessere Verfügbarkeit von Anlagendaten im Vergleich zur Firma AISIN. Bei der ausgewählten Anlage handelt es sich um eine Gasmotorkältemaschine. Dieser Anlagentyp hat eine Nennkälteleistung von 26 kW bei einem Erdgasverbrauch von 3,07 $\frac{m^3}{h}$ [24].

Ein Anlagentyp, der die Leistungsklassen unter 13 kW abdeckt, konnte nicht gefunden werden. Somit kann die Kühlung von Räumen unabhängig von der Gebäudekategorie nicht abgebildet werden. Zur Berechnung des Erdgasbedarfes werden die beiden Anlagentypen in Kapitel 6.2 eine wichtige Position einnehmen.

Abbildung 7: Ausgewählte Anlagen; Robur ACF (links) [23] und YANMAR 450 J-R (rechts) [24])

4 Berechnungsgrundlagen für die Modellierung

4.1 Charakterisierung der Datenbasis

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Wohnsektor in Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen näher beleuchtet. Dazu wird auf interne Daten (folgend „DBI-Datenbank“ genannt) [25] zurückgegriffen, die die Datenbasis für sämtliche Modellierungen bildet. Die Grundlage der Modellierung bilden standortgenaue Adresskoordinaten von Gebäuden, welche mit weiteren standortspezifischen Kennwerten angereichert werden. Hierbei finden sich standortgenaue Informationen zu Kommunen, zum Gewerbe- Handels- und Dienstleistungssektor (GHD), zu Industriestandorten und privaten Haushalten in der Datenbank. Diese Daten beruhen auf verschiedensten externen Datenquellen und beinhalten Informationen zum Gebäudeaufbau, wie beispielsweise den Gebäudetyp, Baujahr und Anzahl der Wohnungen. [25] Alle Standortdaten sind georeferenziert, d.h. die hier betrachteten privaten Haushalte liegen adresspunktgenau aufbereitet in der DBI-Datenbank vor.

Außerdem kann bspw. eine Aussage getroffen werden, ob das betreffende Gebäude über einen Erdgasanschluss verfügt oder nicht, was für spätere Betrachtungen eine entscheidende Determinante zur Evaluierung und Modellierung der Ergebnisse darstellt. Dabei werden sich alle Untersuchungen ausschließlich auf reine Wohngebäude und mischgenutzte Gebäude (Wohnen und Gewerbe, wobei Wohnzwecke überwiegen) beschränken. Für den betrachteten Modellraum in Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen (folgend: Untersuchungsgebiet) ergibt sich demnach ein Betrachtungshorizont von knapp 2,1 Mio. Adresspunkten, die den Betrachtungen zu Grunde liegen werden.[1]

4.2 Einflussparameter auf den Wärmebedarf von Wohngebäuden

4.2.1 Struktur des Wärmeenergieverbrauches im Wohnbereich

Die Bestimmung des standortgenauen Wärmebedarfes bildet die Basis für die nachfolgenden Wärmebedarfsprognosen. Für eine realitätsnahe Modellierung ist die Identifikation von einzelnen Anwendungsbereichen des Wärmesektors notwendig. Es gehören neben den Bereichen Raumwärme und Warmwasser als wichtigste Anwendungsbereiche auch Prozesswärme und Prozesskälte sowie Klimakälte zum Wohnsektor [26]. Dabei hängt der Wärmebedarf privater Haushalte maßgeblich von Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung ab. Insbesondere der Raumwärmebedarf macht mit nahezu drei Vierteln des gesamten Wärmeenergieverbrauches den entscheidenden Anteil aus [27]. Dieser wird im Wohnbereich hauptsächlich mittels der Energieträger Gas und Öl gedeckt [28]. Anhand der beiden Faktoren Raumwärme und Warmwasser sollen die wesentlichen Treiber bzw. Einflussfaktoren auf den Wärmeenergiebedarf aufgezeigt werden.

[1] Deutschlandweit umfasst die DBI-Datenbank [25] mehr als 22 Mio. Adresspunkte von privaten Haushalten, d.h. die betrachtete Region umfasst adresspunkttechnisch ca. ein Zehntel aller Haushalte in Deutschland.

Es wird dabei jeweils in folgende drei Kategorien differenziert, um die Einflussfaktoren klassifizieren zu können:

- *Allgemein*
- *Gebäudespezifisch*
- *Nutzerspezifisch*

Diese sowie deren Strukturierung werden analog zur Dissertation von *Jungbluth* beschrieben [29].

4.2.2 Einflussfaktoren auf den Raumwärmebedarf

In die Kategorie *Allgemein* fallen alle Einflussfaktoren, die mit dem Klima bzw. der Witterung zusammenhängen. Hier werden sich die Einflussparameter hinsichtlich der klimatischen Veränderungen (vgl. Kapitel 2) widerspiegeln.

Die Kategorie *Gebäudespezifisch* beinhaltet alle dem jeweiligen Gebäude zuordenbaren Einflüsse. Als wichtigstes Merkmal ist hier die Wohnfläche zu nennen, die zu beheizen ist. Eine größere Grundfläche führt zu einem höheren Bauvolumen und dementsprechend zu mehr Wärmeenergie, die zur Erwärmung des Raumes benötigt wird. Neben der beheizten Fläche bzw. dem Bauvolumen sind auch Wärmegewinne bzw. Wärmeverluste zu berücksichtigen. Die Wärmegewinne werden nach DIN V 4108-6 [30] in interne und solare Wärmegewinne eingeteilt. Interne Wärmegewinne sind beispielsweise die vom Menschen abgestrahlte Wärme bzw. Abwärme von Elektrogeräten oder Beleuchtungsmitteln. Gleichermaßen wird auch Wärme, die durch in der Wohnung verlaufende Warmwasserleitungen abgegeben wird, als interner Wärmegewinn bilanziert. Unter solare Wärmegewinne hingegen fallen beispielsweise das Aufheizen des Mauerwerks oder der Wärmedurchgang durch die Fenster infolge von Sonneneinstrahlung. Während die internen Wärmegewinne bei privaten Haushalten kaum bei der Berechnung des Raumwärmebedarfes ins Gewicht fallen, sind solare Wärmegewinne beispielsweise durch die Einbauweise von Fenstern oder auch die Farbe des Mauerwerkes gut adaptierbar und dementsprechend zu berücksichtigen [30]. Den Gewinnen stehen die Wärmeverluste aufgrund der Gebäudehülle, insbesondere Transmissions- und Lüftungswärmeverluste [30] gegenüber. Diese werden über den Wärmedurchgangskoeffizienten abgebildet [31]. Das bedeutet, dass Wärme über die Außenwände des Gebäudes nach außen geleitet wird. Dabei ist zu berücksichtigen, wie gut das Gebäude gedämmt ist, denn hier kann der Wärmedurchgang durch die Außenwand entscheidend beeinflusst werden. Große Fensterflächen wirken sich zusätzlich begünstigend auf einen geringeren Heizbedarf aus. Die Dichtheit des Gebäudes (u.a. an Fenstern) ist gleichermaßen wichtig, sodass möglichst wenig Wärmeenergie aufgrund von Undichtigkeiten nach Außen abgegeben wird. Die Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes ist aufgrund dessen Beschaffenheit und Lage auch bei den *gebäudespezifischen* Merkmalen zu beachten.

Die Kategorie *Nutzerspezifisch* beinhaltet alle Faktoren, die aufgrund der Bewohner einen Einfluss auf den Raumwärmebedarf nehmen. Einerseits betrifft dies den Tagesrhythmus der Bewohner, das heißt zu welchen Tageszeiten vornehmlich geheizt werden muss. Ebenso beeinflusst das individuelle Lüftungsverhalten den Raumwärmebedarf. Die gewünschte Raumtemperatur hängt ebenfalls stark von den individuellen Bedürfnissen sowie dem Alter der Bewohner ab [32].

4.2.3 Einflussfaktoren auf den Warmwasserbedarf

Der Warmwasserbedarf wird analog in die drei genannten Kategorien *Allgemein*, *Gebäudespezifisch* und *Nutzerspezifisch* eingeteilt, wenngleich die nutzerspezifische Komponente hier deutlich bedeutsamer ist.

Die Kategorie *Allgemein* beschreibt hauptsächlich, wie - das heißt mit welcher Anlage - das Warmwasser erzeugt wird. Außerdem wird berücksichtigt, ob es sich um dezentrale oder zentrale Versorgungsstrukturen handelt. Zusätzlich haben wochentagspezifische Einflüsse eine Bedeutung, da am Wochenende der Warmwasserbedarf einer anderen zeitlichen Verteilung folgt als unter der Woche.

Der Kategorie *Gebäudespezifisch* wird hier als einziger Faktor die Warmwasserverteilung im Gebäude zugerechnet. Dabei wird berücksichtigt, wie die Warmwasserleitungen im Gebäude verlaufen, um die Transportwege des Warmwassers zu kennen.

Die Kategorie *Nutzerspezifisch* ist, wie eingangs erwähnt, der wichtigste Faktor bei der Ermittlung des Warmwasserbedarfes. Hier gehen die Personenanzahl sowie die einzelnen Bedürfnisse der Bewohner ein. Außerdem wird der Tagesrhythmus berücksichtigt, da der Warmwasserbedarf stark mit der Zeit fluktuiert. Unter den Bedürfnissen der Bewohner sind all diese Tätigkeiten zu verstehen, die mit dem Verbrauch von Warmwasser verbunden sind. Dazu zählen das Baden oder Duschen, aber auch Wohnungsreinigung oder Küchentätigkeiten. Zudem variiert die eingestellte Wassertemperatur personenspezifisch, sodass sich Veränderungen beim Warmwasserbedarf ergeben [32]. Individuelle sozidemografische Präferenzen spielen demnach für die Bestimmung des Warmwasserbedarfes eine große Rolle. Auf eine Normierung des Warmwasserbedarfes auf die Personenanzahl wird verzichtet, wenngleich dies hier zur Anwendung kommen könnte. Der Warmwasserbedarf steigt mit wachsender Personenanzahl im Haushalt an. Weil einerseits die Bedeutung des Warmwasserbedarfes jedoch weitaus geringer ist als die des Raumwärmebedarfes und Warmwasser- sowie Raumwärmebedarf vergleich- und addierbar bleiben sollen, kommt eine Normierung auf die Personenanzahl nicht zur Anwendung. Beide liegen wohnflächennormiert vor.

4.3 Einflussparameter auf den Kühlbedarf von Wohngebäuden

4.3.1 Struktur des Kühlenergieverbrauches im Wohnbereich

Der Energiebedarf eines Gebäudes kann neben dem Wärmeenergiebedarf auch durch den Kühlenergiebedarf beschrieben werden. Dieser Energieaufwand ist abhängig von der Kühllast eines Gebäudes. [33] Die Kühlung eines Wohngebäudes ist in Mitteleuropa jedoch bisher nicht typisch. Durch die in Deutschland vorherrschende gemäßigte Klimazone ist das Heizen aktuell um ein vielfaches Bedeutender. Jedoch werden in Gebäuden immer mehr Kühlsysteme installiert. Dies liegt zum einen an den gestiegenen Komfortansprüchen und zum anderen an den klimawandelbedingten höheren Kühllasten. [33] Die Bestimmung der Kühllast eines Gebäudes wird in der VDI- Richtlinie 2078 beschrieben und kann anhand der dort beschriebenen Einflussfaktoren simuliert werden. Dabei wird eine Unterscheidung in innere und äußere Kühllasten getroffen. [21]

4.3.2 Äußere Kühllasten von Räumen

Äußere Kühllasten beschreiben die Wärmeströme, welche durch Transmission oder Strahlung über die Wände in den Raum gelangen oder Stoffströme, wie warme Luft, die durch Fenster oder Fugen den Raum erwärmen können. [33] Der Einfluss des Klimas und des Wetters ist demnach hauptausschlaggebend für die Betrachtung der äußeren Kühllasten. Denn je stärker sich die Bauteile des Gebäudes erwärmen, desto mehr Kühllast wird zur Raumkonditionierung benötigt. Eine gute Gebäudedämmung hat den Vorteil dies zu verhindern. Die Dämmung verhindert somit ein Eindringen der Wärme in den Raum und hält an kühlen Tagen die Wärme in diesem. [34] Bei einer Überhitzung des Raumes sorgt eine gute Dämmung jedoch dafür, dass die Wärme an kühleren Tageszeiten in den Räumen erhalten bleibt. Die Folge ist ein zusätzlicher Kühlbedarf. [35]

4.3.3 Innere Kühllasten von Räumen

Innere Kühllasten beschreiben die Wärmeströme, welche durch interne sensible und latente Wärmequellen den Raum erwärmen. Interne sensible Wärmequellen sind bspw. Personen und elektrische Anlagen, wie Computer, Fernseher, Tablet, Beleuchtung und andere Maschinen. Im Gegensatz zu latenten Quellen sind sie fühl- und messbar und sollten bei Nichtnutzung ausgeschaltet werden, damit neben dem alltäglichen Energiebedarf auch die notwendige Kühlleistung von Kühlanlagen reduziert werden kann. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass jede Person im Haushalt ebenfalls kontinuierlich Wärme an ihre Umgebung abgibt. [33] Weiterhin ist der Warmwasserbedarf aufgrund der Leitungslegungen durch Gebäude als Wärmequelle und demnach für die Bestimmung der inneren Kühllasten zu berücksichtigen.

Der Einfluss der abgegebenen Wärme interner sensibler Quellen kann durch die bauteilbedingte thermische Speichermasse eines Raumes reduziert werden. Folglich weisen Baumaterialien eine unterschiedliche spezifische Wärmeeindringgeschwindigkeit auf. Im Vergleich zu Luft erwärmen sich Wände, Decken und Boden sehr langsam und dämpfen somit die auftretende Kühllast. Dieser Einfluss hängt im Wesentlichen vom Material, der Masse und Oberfläche der Bauteile wie auch deren Dicke ab. [33]

5 Modellierung und Prognose der standortgenauen Wärme- und Kühlbedarfe in Wohngebäuden in Sachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt

5.1 Vorgehensweise zur Modellierung des Wärmebedarfes

5.1.1 Methodik zur Approximation des gegenwärtigen standortgenauen Wärmebedarfes

Unter Berücksichtigung der genannten Einflussgrößen lässt sich für jeden Datensatz, der in der Datenbank enthalten ist, ein standortgenauer Wärmebedarf modellieren. Hierbei spielen die in Kapitel 4.2 genannten Faktoren eine Rolle. Die Grundlage für die Modellierung bilden in erster Linie die Adresskoordinaten der einzelnen Punkte, für die die Wärmebedarfe modelliert werden. Zusätzlich zu den in Kapitel 4.1 genannten Einflusskriterien, die die Datengrundlage charakterisieren, sind gebäudespezifische Wärmebedarfe pro Quadratmeter beheizter Wohnfläche von Bedeutung. Dabei ist es wichtig, zwischen den Haustypen zu unterscheiden, da hauptsächlich in Abhängigkeit des Gebäudetyps jedem Adresspunkt ein spezifischer Wärmebedarf zugeordnet werden soll. Dabei wird in der DBI-Datenbank in die Haustypen EFH (Ein- und Zweifamilienhäuser) und MFH (Mehrfamilienhäuser) unterschieden. Zur Kombination mit den DBI-Daten werden diese abhängig von Gebäudealter, Bausubstanz und Gebäudetyp weiter spezifiziert. Der gesamte Modellierungsprozess inkl. aller berücksichtigten Einflüsse ist vereinfacht in Abbildung 8 dargestellt.

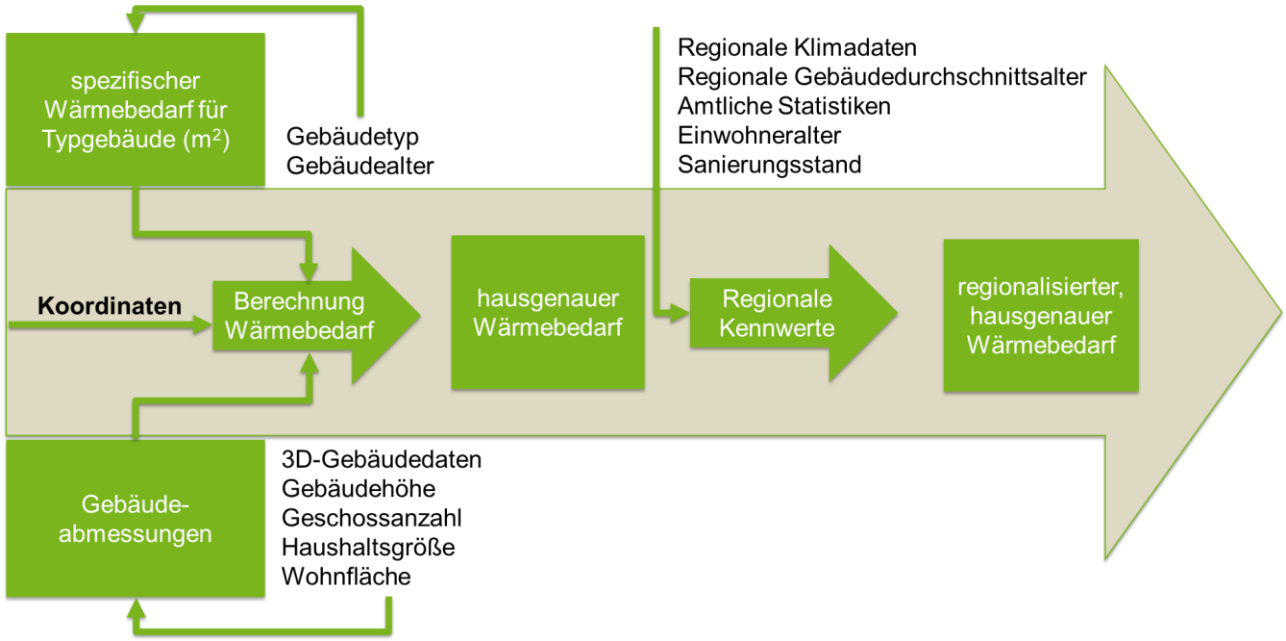


Abbildung 8: Methodik zur Berechnung des Wärmebedarfes [eigene Darstellung]

Im Zuge der Modellierung werden die spezifischen Wärmebedarfe jeweils einem Haustyp zugeordnet. Dabei wird zur Modellierung u.a. der spezifische Wärmebedarf verwendet, der mit der im Gebäude lebenden Anzahl Haushalte korreliert. Die Haushaltsanzahl ist hierbei in den DBI-Daten

Unter Berücksichtigung regionaler Kennwerte kann abschließend der regionalisierte hausgenaue Wärmebedarf modelliert werden, der das standortgenaue Ergebnis beschreibt. Insbesondere der Sanierungsstand sowie die klimatischen Faktoren spielen bei der Regionalisierung eine entscheidende Rolle. Die Sanierungsquoten reduzieren den nötigen Wärmebedarf, da sich die Wärmeverluste der Gebäude mit steigender Sanierung reduzieren.

Zusätzlich wird eine Klimabereinigung der Standorte durchgeführt, wodurch der Wärmebedarf standortabhängig ansteigt oder absinkt. Hintergrund der Klimabereinigung ist, dass zwei sonst identische Gebäude (Abmessung, Wohnfläche, Sanierung, Alter, …) trotzdem aufgrund ihrer geografischen Lage unterschiedliche Wärmebedarfe aufweisen. So ist ein Gebäude, was bspw. in Höhenlage steht anderen jährlichen Witterungsbedingungen ausgesetzt als ein Gebäude, was in der Stadt steht. Aufgrund dessen wird die Klimabereinigung unter Zuhilfenahme von Gradtagszahlen vorgenommen.

5.1.2 Methodik zur Approximation des zukünftigen standortgenauen Wärmebedarfes

Um den Heizwärmebedarf für die nächsten Jahre prognostizieren zu können, gilt es, die wichtigsten Einflussparameter zu recherchieren und deren Auswirkung zu ermitteln. Dabei ergeben sich einige Veränderungen im Vergleich zur gegenwärtigen Approximation. Diese Veränderungen sind im Wesentlichen in fünf Parametern abzubilden, welche in Abbildung 9 dargestellt sind.

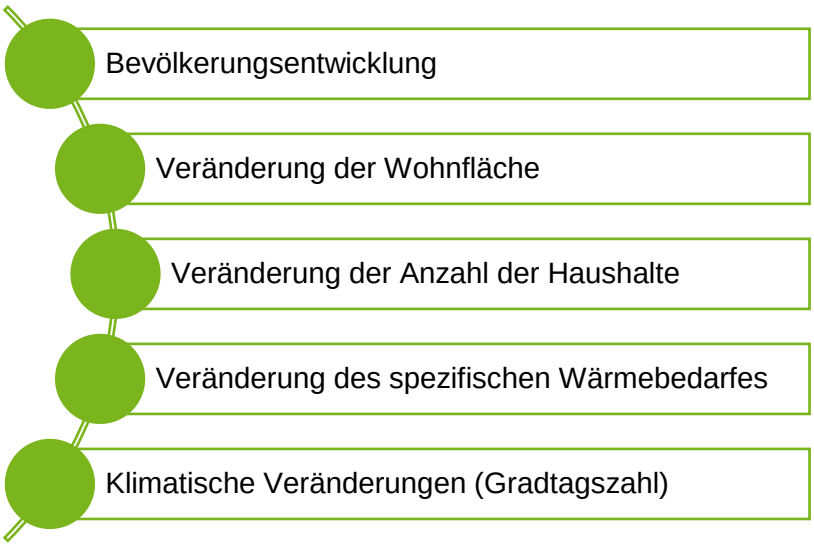


Abbildung 9: Variable Einflussfaktoren auf die Approximation des zukünftigen Wärmebedarfes [eigene Darstellung]

Alle nicht in der Abbildung dargelegten Faktoren bleiben für die Approximation der Prognose unberührt, d.h. an der Anzahl, Größe sowie Verteilung der Gebäude bzw. Gebäudetypen wird als konstant angesehen.

Die Bevölkerungsentwicklung, die Veränderungen der Wohnfläche sowie die Veränderungen bei der Anzahl der Haushalte liegen aufgrund vorangegangener Untersuchungen bereits prognostiziert in der DBI-Datenbank adresspunktgenau vor. Dazu wurden Daten des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt und Raumforschung (BBSR) verwendet, die diese Veränderungen bis zum Jahr 2030 bereits untersucht haben. [36] Für die folgenden Jahre wurden die Trends in der DBI-Datenbank fortgeschrieben. Daraus resultiert, dass die Wohnfläche pro Haushalt in allen drei Bundesländern des Untersu-

chungsgebiets bis zum Jahr 2050 um bis zu 30 % zunimmt. Gleichermaßen nimmt die Haushaltsanzahl insgesamt um bis zu 20 % ab. Die Bevölkerungsentwicklung im Untersuchungsgebiet ist, von den Großstädten des Untersuchungsgebietes abgesehen, ebenfalls rückläufig. [37]

Die klimatischen Veränderungen beschreiben den letzten Einfluss, der für die Prognose entscheidend ist. Um eine differenzierte Betrachtung hinsichtlich der klimatischen Entwicklung vornehmen zu können, werden Klimadaten des Regionalmodells REMO-UBA angetrieben durch das Globalmodell ECHAM5/MPI-OM (Lauf 1) für die Emissionsszenarien A1B (umweltorientierte globale Gemeinschaft unter Nutzung fossiler und erneuerbarer Energien) und A2 (wirtschaftsorientierte Einzelstaaten) verwendet [18] (vgl. Kapitel 2). Damit sind die eher konservativen Szenarien für die Prognose der klimatischen Veränderungen gewählt worden. Um den Klimafaktor einzubeziehen wurden entsprechend der Prognosestützjahre (2030 und 2050) neue mittlere Gradtagszahlen bestimmt und auf die Referenzgradtagszahl normiert. Als Zeitraum der Ausmittlung wurden das jeweilige Stützjahr +/- 2 Jahre gewählt, sodass bspw. für das Stütz- und Prognosejahr 2030 die mittlere Gradtagszahl von 2028 bis 2032 in die Berechnung eingeht. Dies ist nötig, um Extrema der einzelnen Betrachtungsjahre abfedern zu können und eine mittlere Tendenz anzugeben. Es ergeben sich demnach in Abhängigkeit der Temperaturänderungen andere standortgenaue Gradtagszahlen und somit ein anderer Faktor zur Klimabereinigung, der in die Berechnung des standortgenauen Wärmebedarfes eingeht. Der Ablaufprozess der Berechnung ist stark vereinfacht in Abbildung 10 dargestellt.

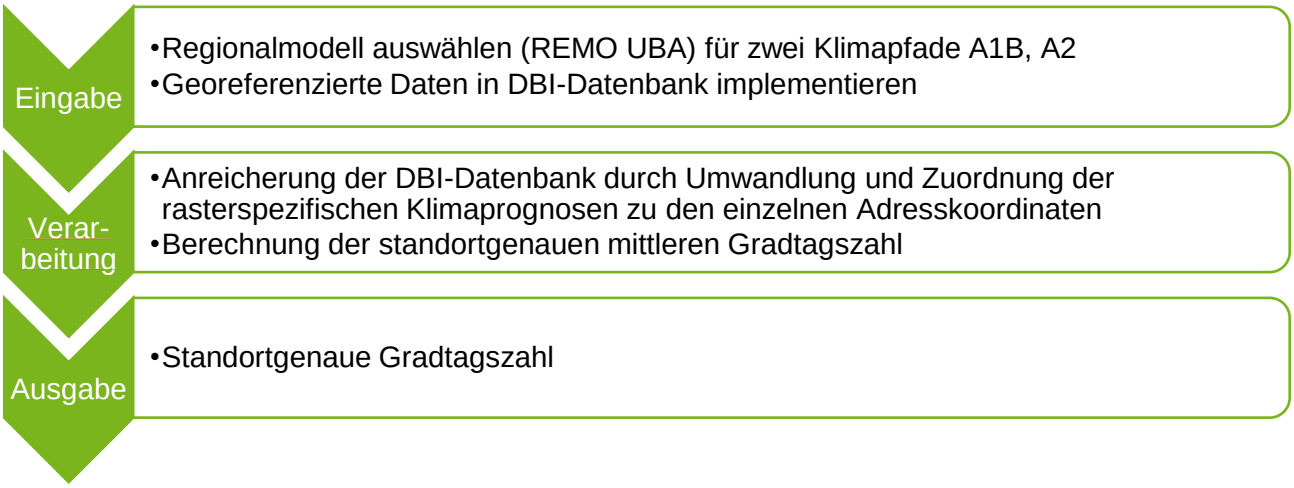


Abbildung 10: Vorgehensweise zur Ermittlung der prognostizierten Gradtagszahlen [eigene Darstellung]

Aufgrund der in den Klimamodellen simulierten Temperaturanstiege ist davon auszugehen, dass der Klimabereinigungsfaktor für das gesamte Untersuchungsgebiet geringer ausfällt und sich die Wärmebedarfe im Vergleich zur Gegenwart reduzieren werden. Sowohl im A1B als auch im A2 Szenario steigt die Temperatur an, wobei sie im A2 Szenario stärker zunimmt. Demnach ergeben sich je Emissionsszenario andere Wärmebedarfe. Wie stark sich dies szenarienspezifisch auswirkt, wird im Kapitel 0 bei der Ergebnisvorstellung beleuchtet.

5.2 Vorgehensweise zur Modellierung des Kühlbedarfes

Für die Modellierung des standortgenauen Kühlbedarfes im Wohnsektor des Untersuchungsgebiets liegen bisher keine Veröffentlichungen in anderen Literaturquellen vor. Um eine Vergleichbarkeit mit der Wärmemodellierung zu erzielen, wurde daher die methodische Vorgehensweise äquivalent zur

Wärmebedarfsberechnung durchgeführt. Das heißt, die Basis bilden dieselben Annahmen, die bei der Wärmebedarfsberechnung hinsichtlich der Gebäude getroffen worden sind. Die Veränderungen hinsichtlich Wohnfläche, Anzahl Haushalte, Bevölkerungsentwicklung werden demnach äquivalent angenommen. Auch die Verwendung der Emissionspfade A1B und A2 wird nicht verändert.

Zur standortgenauen Berechnung sind äquivalent zur Wärmebedarfsrechnung spezifische Kühlbedarfe recherchiert worden. Diese stellen wie die spezifischen Wärmebedarfe einen gebäudespezifischen Kennwert dar und sind daher für die entsprechenden Gebäudetypen unterschiedlich. Die verwendeten spezifischen Kühlbedarfe sind nach [35] in Tabelle 1 aufgezeigt.

Tabelle 1: Spezifischer Kühlbedarf der verschiedenen Gebäudetypen [eigene Darstellung nach [35]]

Gebäudetyp	Altbau	Standard	Niedrigenergie
Einfamilienhäuser (EFH)	1,1 $\frac{kWh}{m^2a}$	2,2 $\frac{kWh}{m^2a}$	3,0 $\frac{kWh}{m^2a}$
Mehrfamilienhäuser (MFH)	0,5 $\frac{kWh}{m^2a}$	1,1 $\frac{kWh}{m^2a}$	1,7 $\frac{kWh}{m^2a}$

Unter Zuhilfenahme der Kennwerte aus Tabelle 1 werden den jeweiligen Gebäudetypen der DBI-Datenbank die spezifischen Kühlbedarfe zugeordnet. Dabei erfolgt neben der methodischen Differenzierung in die Haustypen (EFH/MFH) äquivalent zur Wärmebedarfsberechnung eine Einbeziehung des Gebäudebaujahres, da aufgrund der Beschaffenheit (Altbau/Standard/Niedrigenergie) andere spezifische Kühlbedarfe anzusetzen sind. Im Gegensatz zum spezifischen Wärmebedarf werden die spezifischen Kühlbedarfe über die Prognosedauer als konstant angesehen, da es aus aktueller Sicht unklar ist, wie sich Gebäudemodernisierungen konkret auf die nötigen Kühllasten auswirken. Zwar wird insgesamt ein steigender Kühlbedarf erwartet, es liegen jedoch keine Untersuchungen vor, welchen Einfluss ggfs. veränderte spezifische Kühllasten zu diesem Effekt beitragen. [38]

Zur Berücksichtigung des klimatischen Einflusses werden analog zum Wärmebedarf Gradtagszahlen bestimmt. Basis bilden wie bei der Wärmebedarfsberechnung dieselben Klimaprojektionen des Umweltbundesamtes. Zur Bestimmung des klimatischen Einflusses wird jedoch methodisch eine Änderung bei der Gradtagszahlbestimmung vorgenommen. Während beim Heizen eine Heizgrenze von 15 °C und eine angenommene Rauminnentemperatur von 20 °C angenommen wurde (vgl. Kapitel 4.2.2), wird beim Kühlen die Kühlgrenze und angenommene Rauminnentemperatur gleich gewählt. Demnach wird im Folgenden nicht mehr von Gradtagszahlen sondern von Gradtagen gesprochen. Die angenommene Rauminnentemperatur sowie Kühlgrenze liegen bei 18,3 °C, was den amerikanischen „Cooling Degree Days“ von 65 °F entspricht [39]. Dieser Wert wurde u.a. bereits vom UBA für andere Untersuchungen übernommen, weshalb eine Verwendung für die Modellierung nahe liegt [40]. Zur Aufrechterhaltung der methodischen Äquivalenz wurden analog zur Referenzgradtagszahl für das Heizen Referenzkühlgradtage gebildet. Diese wurden nach den beschriebenen Annahmen für die Wetterstation Potsdam analog mit dem zugrunde liegenden langjährigen Temperaturmittel von 1995 bis 2012 berechnet (vgl. Kapitel 5.1.1). Die Referenz, die sich anhand der Klimastationsdaten von Potsdam für die Berechnung des gegenwärtigen Kühlbedarfes ergibt, liegt bei 157 Kd.

5.3 Ergebnis der standortgenauen Wärme- und Kühlbedarfsmodellierung

5.3.1 Wärmebedarf

Nach der standortgenauen Berechnung liegt für jeden Adresspunkt ein modellierter Wärmebedarf vor. Aufgrund der Menge an Koordinaten werden zu Darstellungszwecken Raster verwendet. Jedes Raster spannt dabei eine Fläche von 50x50 m auf. Die Wärmebedarfe aller Adresspunkte, die in einem Raster liegen, werden rasterspezifisch summiert und ausgewertet. Tabelle 2 zeigt die Wärmebelegung je Raster auf. In Abbildung 11 wird zudem nach der entsprechenden Clusterung farblich dargestellt, wie die einzelnen Wärmebelegungen im Untersuchungsgebiet verteilt sind. Insgesamt ergeben sich 930.848 mit privaten Wärmeabnehmern belegte Rasterpolygone.

Tabelle 2: Clusterung der Wärmebelegung der einzelnen Raster [eigene Berechnung]

Cluster Klasse	Anzahl Raster
größer als 250.000 kWh/a	30.534
zwischen 100.000 kWh/a und 250.000 kWh/a	146.377
zwischen 25.000 kWh/a und 50.000 kWh/a	242.716
zwischen 50.000 kWh/a und 100.000 kWh/a	255.572
bis 25.000 kWh/a	255.649

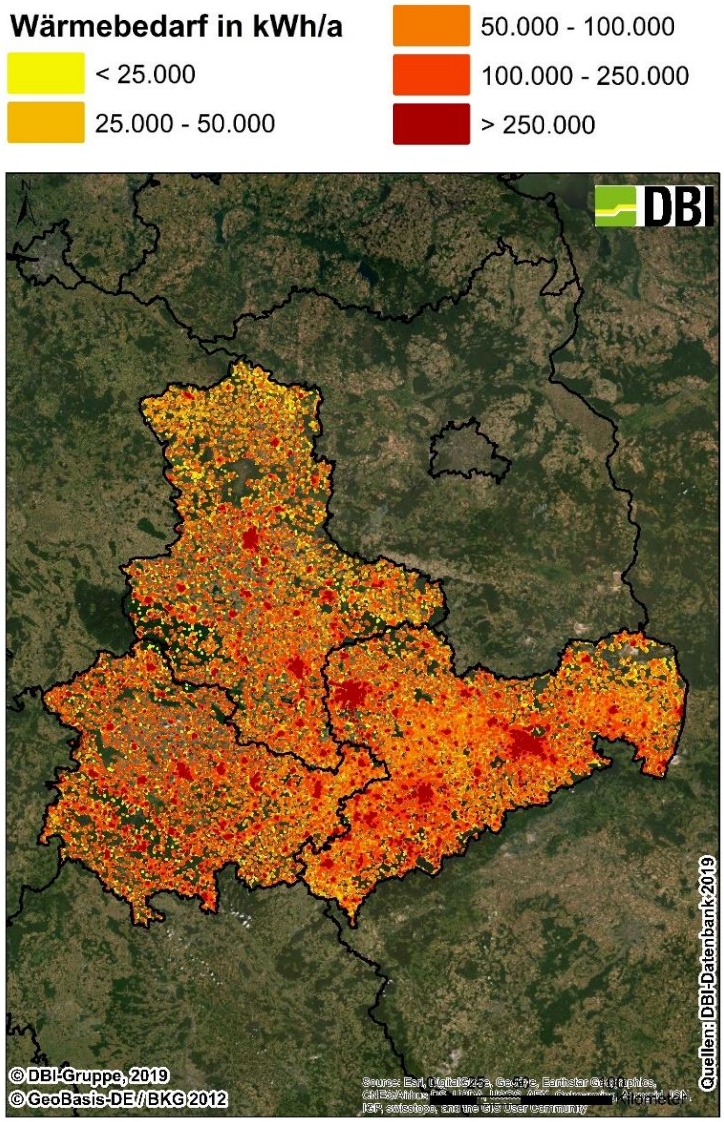
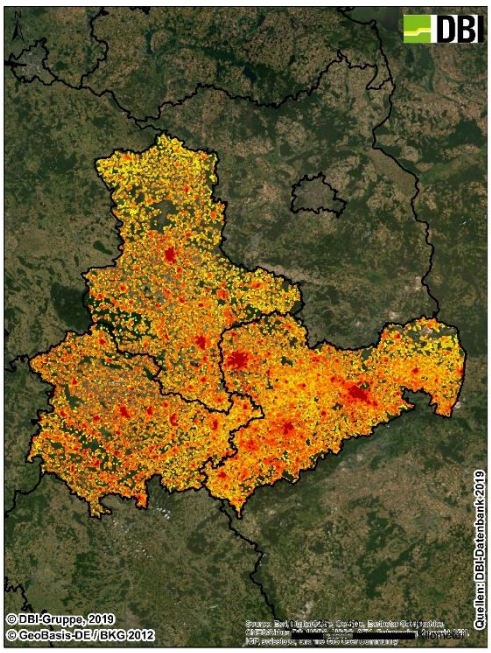


Abbildung 11: Wärmerasterdarstellung im Untersuchungsgebiet [eigene Darstellung]

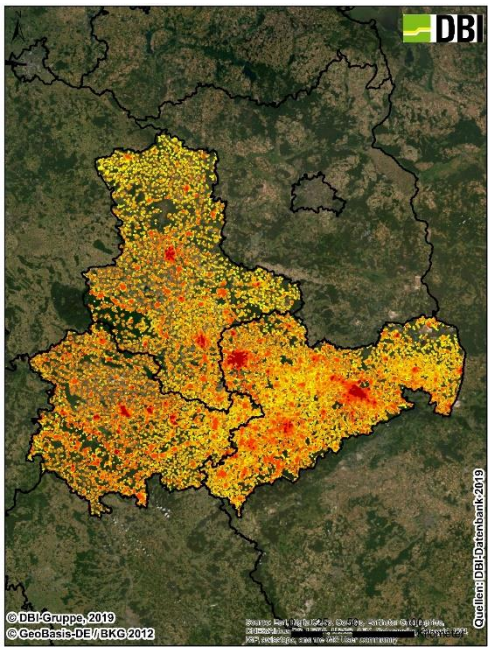
Auffallend ist eine allgemeine Konzentration des Heizwärmebedarfs in den städtischen Ballungsgebieten mit zunehmender Einwohnerzahl. In Sachsen sind hohe Nachfragen im Raum Leipzig, Dresden, Chemnitz und Zwickau erkennbar. In Thüringen hauptsächlich im Raum Erfurt und in Sachsen-Anhalt rund um Magdeburg und Halle. Mit zunehmender Entfernung von den Städten ist eine Abnahme der Heizwärmebedarfe erkennbar. Im Gegensatz zu den Regionen mit hoher Nachfrage sind auch Gebiete mit geringem bis keinem Wärmebedarf erkennbar - beispielsweise die Tagebaugebiete im Nord-Osten Sachsens als auch das militärische Übungsgelände in der Heide im Norden Magdeburgs.

Weiterführend konnte die Prognose entsprechend der Emissionsszenarien erstellt werden. Die Darstellung der Stützjahre 2030 und 2050 ist äquivalent zur gegenwärtigen Situation erfolgt. Zur Auswertung der einzelnen Stützjahre und Szenarien sind die rasterspezifischen Ergebnisse der Prognose in Abbildung 12 dargestellt.

Wärmebedarf 2030 A1B



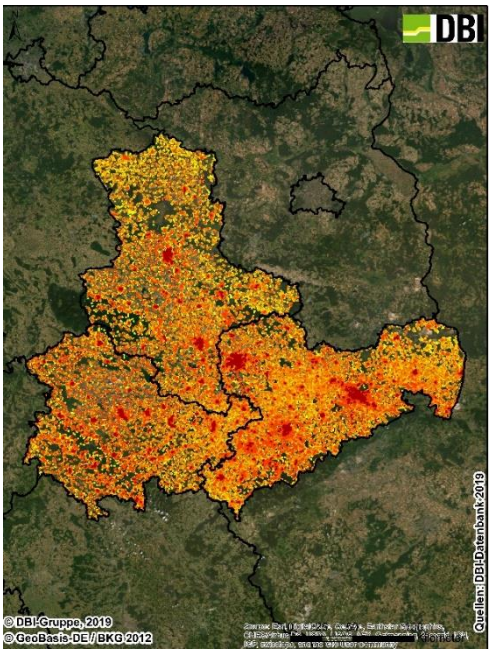
Wärmebedarf 2050 A1B



Wärmebedarf in kWh/a

- < 25.000
- 25.000 - 50.000
- 50.000 - 100.000
- 100.000 - 250.000
- > 250.000

Wärmebedarf 2030 A2



Wärmebedarf 2050 A2

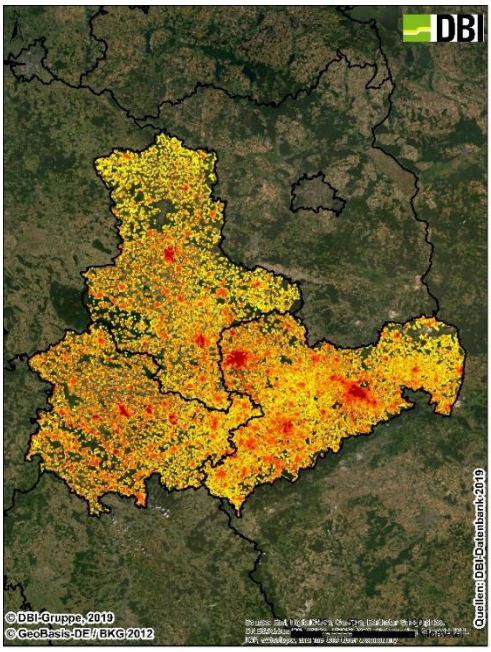


Abbildung 12: Gegenüberstellung der prognostizierten Wärmebedarfe für 2030 und 2050 je Emissionsszenario [eigene Darstellung]

Während im Jahr 2030 nur geringfügige Unterschiede erkennbar werden, so ist im Jahr 2050 ein deutlicher Unterschied hinsichtlich der Emissionsszenarien A1B und A2 ersichtlich. Für 2050 werden im A2 Szenario deutlich geringere Wärmebedarfe approximiert als im A1B Szenario. Dies begründet sich in dem stärkeren Temperaturanstieg, der dem A2 Szenario zugrunde liegt. Mit fortschreitender Zeit wird sich die Mitteltemperatur im A2 Szenario stärker erhöhen als im A1B Szenario (vgl. Kapitel 2) Dies hat einerseits zur Folge, dass aufgrund der festgelegten Heizgrenztemperatur von 15 °C insgesamt im A2 Szenario weniger oft geheizt werden muss. Andererseits wird an den Tagen, wo die Heizgrenztemperatur im A2 Szenario unterschritten ist, der zur Aufheizung des Raumes benötigte Energiebedarf geringer sein als im A1B Szenario. Beide Einflüsse sorgen gleichermaßen für geringere Wärmebedarfe im Wohnbereich. Die Reduktion des Wärmebedarfes wird jedoch in beiden Szenarien im Vergleich zum gegenwärtigen Zustand deutlich erkennbar.

5.3.2 Kühlbedarf

Die Darstellung der standortgenau berechneten Kühlbedarfe erfolgt analog zur Darstellung der Wärme, d.h. auch hier werden die Bedarfe rasterspezifisch aufsummiert. Die Tabelle 3 zeigt die Kühlbelegung je Rasterzelle entsprechend des jeweiligen Emissionspfades auf.

Tabelle 3: Clusterung der Kühlbelegung der einzelnen Raster je Emissionspfad [eigene Berechnung]

Cluster Klasse	Anzahl Raster A1B	Anzahl Raster A2
größer als 5.000 kWh/a	130	58
zwischen 2.000 kWh/a und 5.000 kWh/a	8.124	5.027
zwischen 1.000 kWh/a und 2.000 kWh/a	40.707	28.218
zwischen 500 kWh/a und 1.000 kWh/a	128.091	100.733
bis 500 kWh/a	753.717	796.733

Für beide Emissionsszenarien wird ersichtlich, dass die Mehrheit des rasterspezifischen modellierten Kühlbedarfes in einem Bereich bis 500 kWh/a pro 50x50 m Raster liegt. Dies impliziert, dass die jährlichen Kühlbedarfe gegenwärtig noch sehr gering sind. Insbesondere im Vergleich zum Heizen fällt auf, dass der Bedarf deutlich geringer ausfällt. Die Unterschiede hinsichtlich der Emissionsszenarien sind dabei marginal. Dies wird auch anhand der rasterspezifischen kartografischen Gegenüberstellung in Abbildung 13 deutlich.

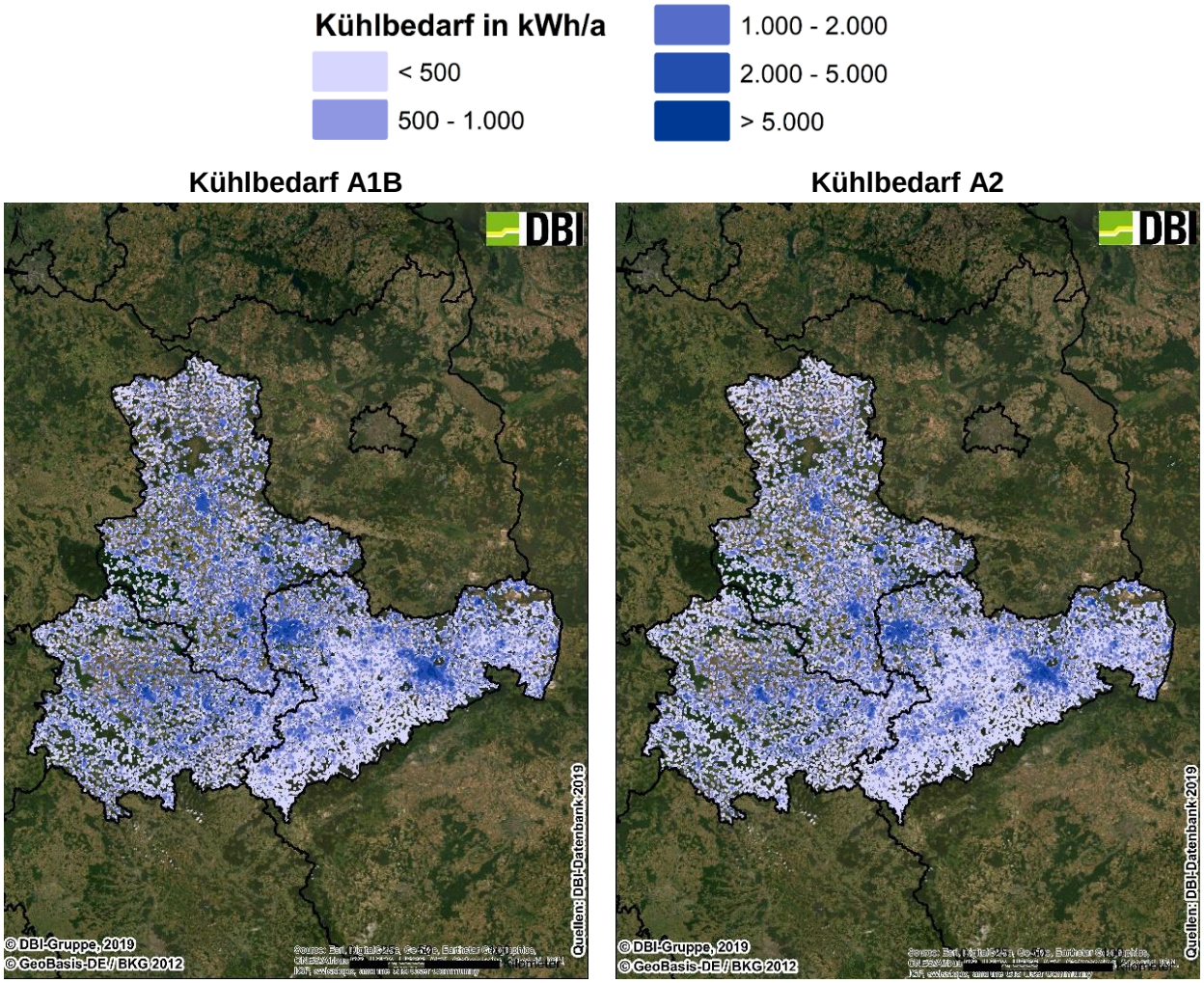


Abbildung 13: Kühlrasterdarstellung im Untersuchungsgebiet je Emissionspfad [eigene Darstellung]

Aufbauend auf der Darstellung der szenarienspezifischen Ist-Stände konnten die Prognosewerte für die Stützjahre 2030 und 2050 erstellt werden. Dabei wird äquivalent zur Wärmerasterdarstellung die Einteilung der Cluster beibehalten, sodass eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse und Darstellungen gewährleistet werden kann. Die Ergebnisse sind folgend in Abbildung 14 dargestellt. Im Gegensatz zum sinkenden Wärmebedarf wird ein steigender Kühlbedarf prognostiziert, was auf den Einfluss der klimatischen Veränderungen zurückzuführen ist. Hierbei wird ersichtlich, dass im Szenario A2 deutlich mehr Gebiete mit Kühlbedarf vorhanden sind. Die Gebiete mit weniger als 500 kWh/a Kühlbedarf sind zudem deutlich weniger ausgeprägt als bspw. beim gegenwärtigen Stand, aber auch im Vergleich zu den Prognosen des A1B Szenarios. Dies zeigt, dass die stärker prognostizierte Erwärmung im A2 Szenario einen höheren Kühlbedarf zur Folge haben wird.

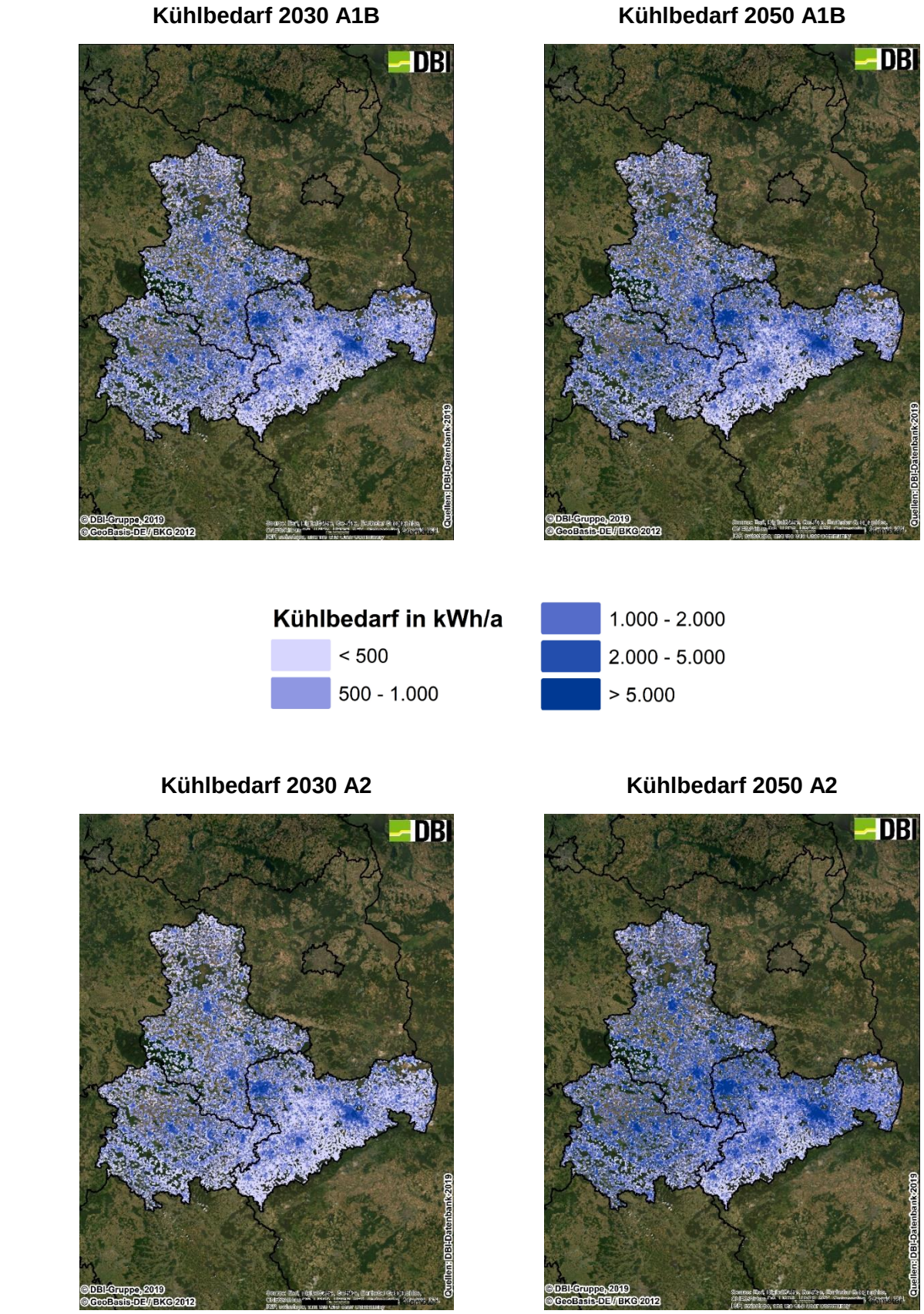


Abbildung 14: Gegenüberstellung der prognostizierten Kühlbedarfe für 2030 und 2050 je Emissionsszenario [eigene Darstellung]

6 Bestimmung standortgenauer Erdgasbedarfe in Wohngebäuden in Sachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt

6.1 Erdgasbedarf infolge des häuslichen Wärmebedarfes

6.1.1 Vorgehensweise zur Bestimmung des Erdgasbedarfes fürs Heizen

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt die Wärme- und Kühlbedarfe im Wohnbereich approximiert worden sind soll darauf aufbauend der Erdgasbedarf bestimmt werden. Dabei wird methodisch in die Berechnung von Heiz-Gasbedarf und Kühl-Gasbedarf differenziert.

Die Berechnung des Heiz-Gasbedarfes berücksichtigt verschiedene Kriterien. Dies sind im Wesentlichen der standortgenau approximierte Wärmebedarf, die Erdgasversorgungslage (Gasanschlussverfügbarkeit) sowie der durchschnittliche Nutzungsgrad von erdgasbetriebenen Heizungen. Als Nutzungsgrad wurde ein Wert von 95 % angenommen, der sich aufgrund einer gemischten Heizungsstruktur von Brennwerttechnik sowie Nicht-Brennwerttechnik zusammensetzt [41].

Außerdem geht eine Erdgas-Versorgungsquote in die Berechnungen ein. Dazu wurde recherchiert, wieviel Prozent aller Heizungen je Bundesland (Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen) Erdgas als Brennstoff verwenden. Für die Prognosen für 2030 und 2050 wurden diese recherchierten Werte anhand von bundesweiten Trends fortgeschrieben. Gegenwärtig sind bundesweit 48,2 % aller Heizungen erdgasversorgt. Dieser Wert soll sich nach Prognosen bis 2030 auf 58,3 % erhöhen, um bis 2050 wieder auf 54,8 % abzusinken, da eine vermehrte Verwendung von Wärmepumpenheizungen o.ä. für die Beheizung prognostiziert wird [42]. Dieser Entwicklungstrend wurde in der weitern Berechnung unterstellt. Daraus ergeben sich die in Tabelle 4 dargestellten Versorgungsquoten, die neben den weiteren genannten Kriterien in die Berechnung des Gasbedarfes einfließen.

Tabelle 4: Bundeslandspezifische Entwicklung der erdgasversorgten Gebäude [eigene Berechnung nach [42] auf Basis von Daten nach [43]]

Bundesland	Gegenwärtig [43]	2030	2050
Sachsen	44,60 %	53,95 %	50,71 %
Sachsen-Anhalt	55,50 %	67,13 %	63,10 %
Thüringen	46,10 %	55,76 %	52,41 %

6.1.2 Ergebnisse

Anhand der genannten Einflussparameter werden standortgenaue Heiz-Erdgasbedarfe berechnet, die anschließend auf Gemeindeebene summiert worden sind. Dabei wurde für die Prognosen ent-

sprechend des jeweiligen Berechnungsjahres auf die zuvor approximierten Wärmebedarfe zurückgegriffen, d.h. es ergeben sich Unterschiede hinsichtlich der Emissionsszenarien. In Abbildung 15 sind die gegenwärtigen Erdgasbedarfe (Heizen) dargestellt, während in Abbildung 16 eine Gegenüberstellung der Prognosen entsprechend des Emissionsszenarios erfolgt. Auffällig ist eine kontinuierliche Bedarfsabnahme mit fortschreitender Prognosedauer, was einen verminderten Erdgasbedarf infolge klimatischer und gebäudetechnischer Veränderungen impliziert. Insbesondere in ländlichen bzw. suburbanen Gebieten wird dies ersichtlich. Im gesamten Untersuchungsgebiet wird eine Gasbedarfsreduktion von ca. 37 % bis zum Jahr 2050 approximiert.

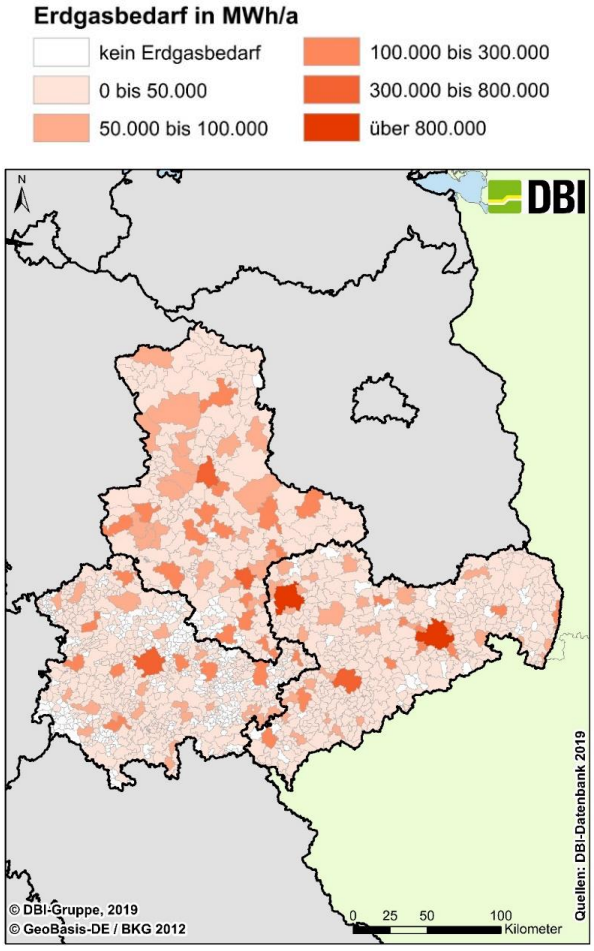
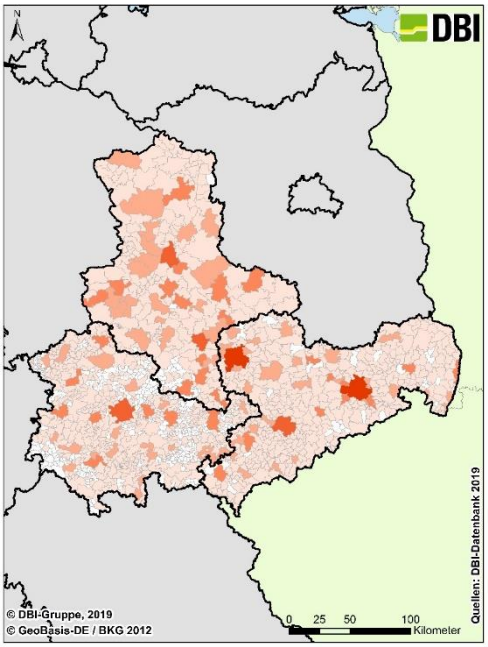
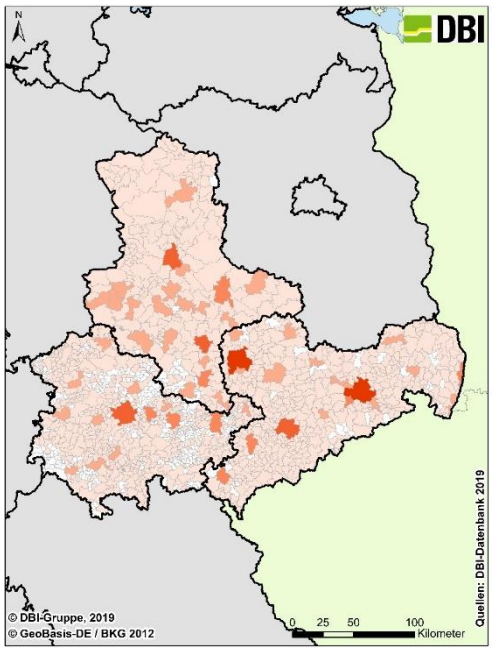


Abbildung 15: Gegenwärtiger Erdgasbedarf (Heizen) auf Gemeindeebene [eigene Darstellung]

Erdgasbedarf Heizen auf Gemeindeebene A1B 2030



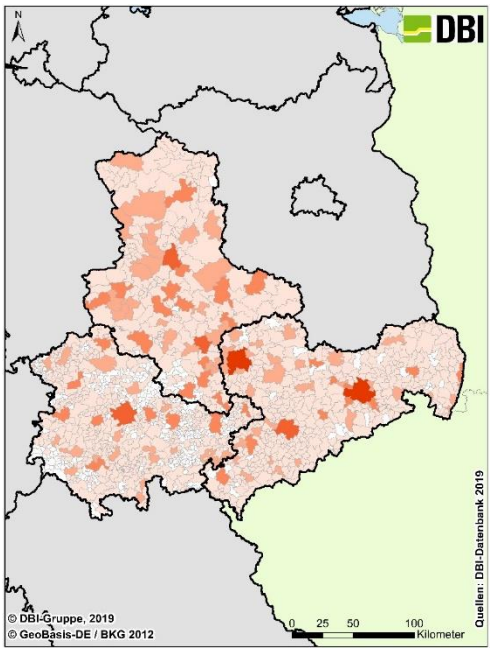
Erdgasbedarf Heizen auf Gemeindeebene A1B 2050



Erdgasbedarf in MWh/a

kein Erdgasbedarf	100.000 bis 300.000
0 bis 50.000	300.000 bis 800.000
50.000 bis 100.000	über 800.000

Erdgasbedarf Heizen auf Gemeindeebene A2 2030



Erdgasbedarf Heizen auf Gemeindeebene A2 2050

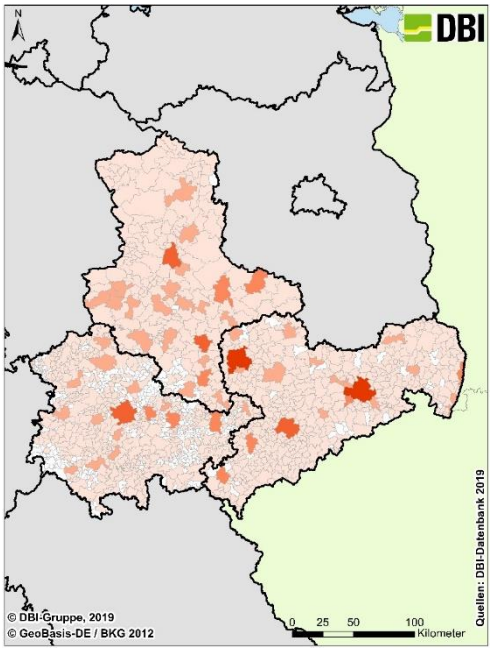


Abbildung 16: Gegenüberstellung der prognostizierten Erdgasbedarfe (Heizen) für 2030 und 2050 je Emissionsszenario [eigene Darstellung]

6.2 Erdgasbedarf infolge des häuslichen Kühlbedarfes

6.2.1 Vorgehensweise zur Bestimmung des Erdgasbedarfes fürs Kühlen

Aus dem gebäudespezifischen Kühlbedarf lässt sich im Folgenden der Erdgasbedarf für Kühlen durch erdgasbetriebene Klimatisierungstechnik bestimmen. Für die Ermittlung des Erdgasbedarfes infolge des häuslichen Kühlbedarfs wurden jeweils vier Szenarien pro Klimapfad (A1B, A2) bestimmt. Die Aufstellung der Szenarien ist in Abbildung 17 visualisiert

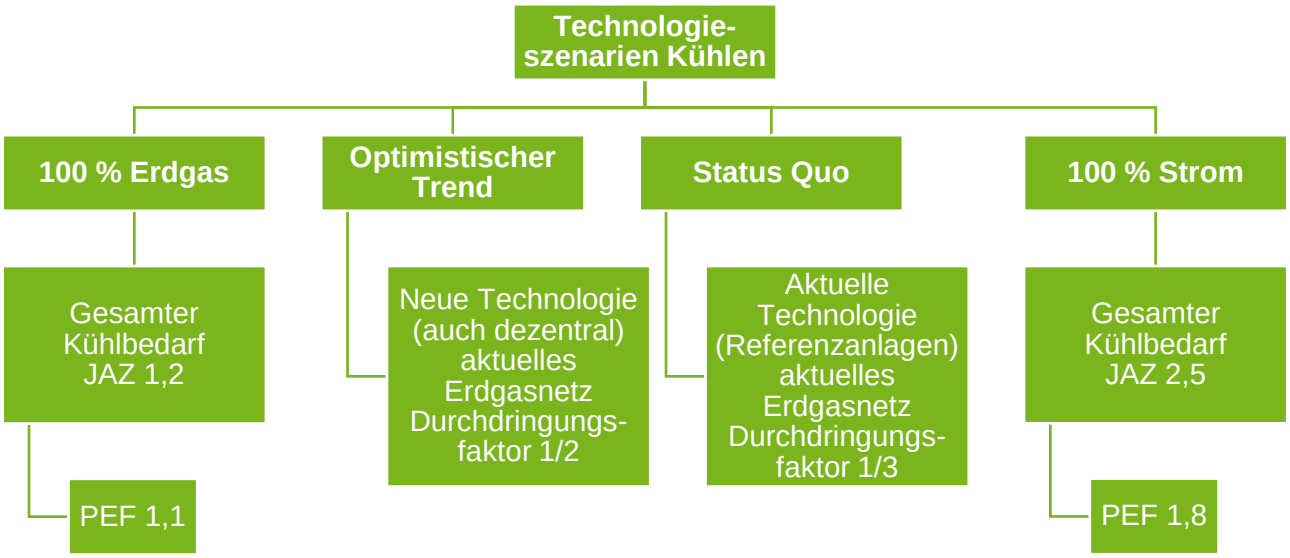


Abbildung 17: Technologieszenarien zur Bestimmung des Erdgasbedarfes (Kühlen) im Wohnsektor [eigene Darstellung]

Zwei dieser Szenarien bilden jeweilige Extremfälle ab. So bildet das 100 % Erdgas-Szenario unabhängig von allen Randbedingungen ab, wieviel Erdgas maximal zur Deckung der zuvor in Kapitel 5.2 modellierten Kühlbedarfe verwendet werden könnte. Es wird die Annahme getroffen, dass sämtliche Kühlbedarfe ausschließlich durch Erdgas gedeckt werden. Dem gegenüber wird im 100 % Strom-Szenario abgebildet, dass sämtlicher anfallender Kühlbedarf ausschließlich durch strombasierte Technologien gedeckt wird. Dies ist insbesondere für die primärenergetische Validierung (vgl. Kapitel 6.3) von Bedeutung. Die anderen zwei „mittleren“ Szenarien des optimistischen Trends sowie des Status Quo richten sich mehr anhand der Datenbasis und Marktverfügbarkeit aus. Beim Status Quo Szenario werden die aktuellen Technologien, d.h. die in Kapitel 3 ausgewählten zwei Referenzanlagen, zugrunde gelegt. Um die Referenzanlagen möglichst passend zu den Gebäuden zuordnen zu können, wurde anhand des standortgenauen Kühlbedarfes unter Zuhilfenahme einer typischen Volllaststundenzahl für Klimageräte von 80 h [38] eine Kühllast berechnet. Diese ist ein Indikator, um die passende Anlage bzw. ggfs. auch keine Anlage zuzuweisen. Die berechneten Kühllasten wurden klassifiziert, um eine Abgrenzung zwischen den einzelnen Adresspunkten und Technologieszenarien zu gewährleisten. Die Klassifizierung ist in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Klassifizierung der Kühllasten und Zuordnung der entsprechenden Anlagen

Kühllast	Beurteilung bzw. Anlagenauswahl
bis 2,5 kW	zu geringe Leistung, keine gasbetriebenen Anlagen verfügbar
2,5 kW bis 5 kW	zu geringe Leistung, keine gasbetriebenen Anlagen verfügbar
5 kW bis 10 kW	zukünftig möglicherweise Anlagen auf dem Markt verfügbar → Berücksichtigung für **optimistischen Trend**
10 kW bis 20 kW	Anlage verfügbar, Referenzanlage: Robur GA ACF HAT → Berücksichtigung für **Status Quo** und **optimistischen Trend**
20 kW bis 30 kW	Anlage verfügbar, Referenzanlage: Yanmar 450 J-R → Berücksichtigung für **Status Quo** und **optimistischen Trend**
30 kW und 40 kW	Anlage verfügbar, doppelt ausgeführte Referenzanlage Robur GA ACF HT → Berücksichtigung für **Status Quo** und **optimistischen Trend**
größer als 40 kW	Anlage verfügbar, mehrfach ausgeführte Referenzanlage Yanmar 450 J-R → Berücksichtigung für **Status Quo** und **optimistischen Trend**

Entsprechend der Tabelle 5 konnte jedem Gebäude eine Referenzanlage mit Nennleistung und spezifischem Erdgasbedarf in m³ Erdgas pro Stunde zugewiesen werden. Durch Teilen des Kühlbedarfs durch die Nennleistung konnte die jährliche Volllaststundenzahl je Gebäude ermittelt werden. Diese wurde mit dem Erdgasverbrauch der jeweiligen Anlage bzw. Anlagen multipliziert, um gebäudescharf den jährlichen Erdgasbedarf zu approximieren. Dies wurde entsprechend der vorgestellten Szenarien Status Quo sowie optimistischer Trend durchgeführt.

6.2.2 Ergebnisse

Anhand der genannten Einflussparameter und -szenarien sind standortgenaue Kühl-Erdgasbedarfe berechnet worden, die anschließend auf Gemeindeebene summiert wurden. Dabei wurde für die Prognosen entsprechend des jeweiligen Berechnungsjahres auf die zuvor approximierten Kühlbedarfe zurückgegriffen, d.h. es ergeben sich Unterschiede hinsichtlich der Emissionsszenarien. In Abbildung 18 sind die gegenwärtig approximierten Erdgasbedarfe (Kühlen) für das Status Quo und optimistische Trendszenario gegenübergestellt. In Abbildung 19 werden die Prognosewerte für den A1B-Emissionspfad gegenübergestellt, während in Abbildung 20 eine Gegenüberstellung der Prognosen entsprechend des A2-Emissionspfades erfolgt.

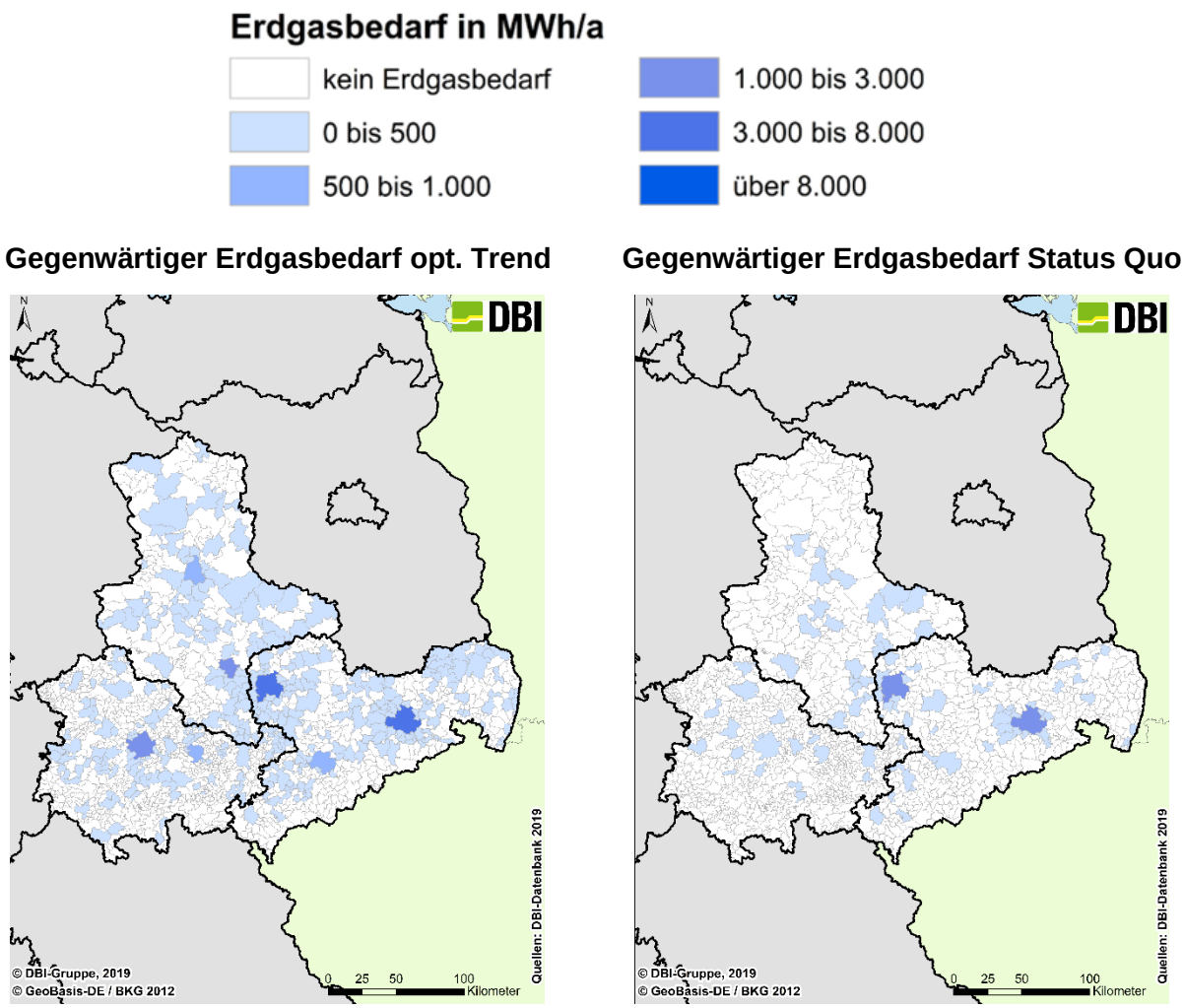
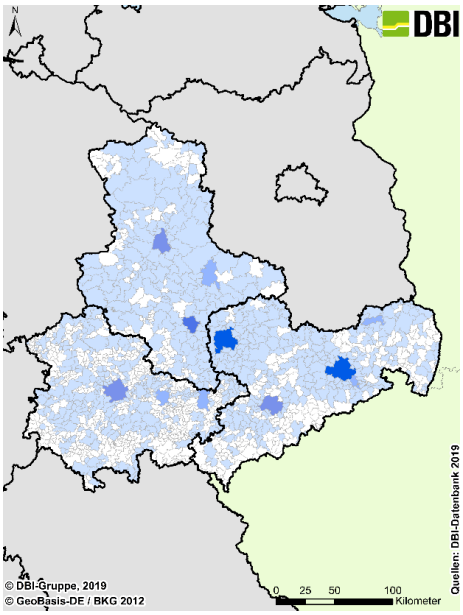
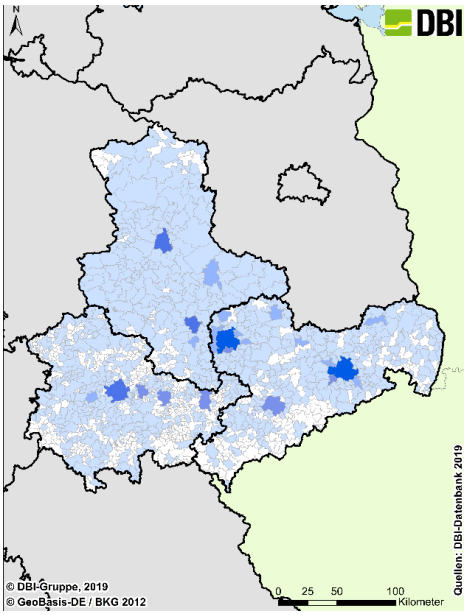


Abbildung 18: Gegenüberstellung der gegenwärtigen Erdgasbedarfe (Kühlen) für das optimistische Trend- bzw. Status Quo-Szenario [eigene Darstellung]

Erdgasbedarf Kühlen auf Gemeindeebene, A1B 2030 optimistischer Trend



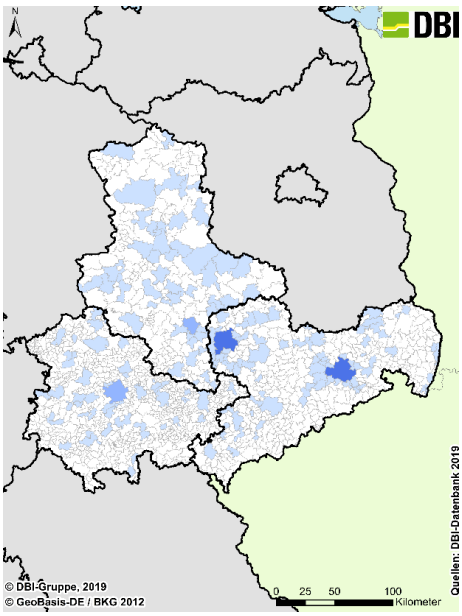
Erdgasbedarf Kühlen auf Gemeindeebene, A1B 2050 optimistischer Trend



Erdgasbedarf in MWh/a

kein Erdgasbedarf	1.000 bis 3.000
0 bis 500	3.000 bis 8.000
500 bis 1.000	über 8.000

Erdgasbedarf Kühlen auf Gemeindeebene, A1B 2030 Status Quo



Erdgasbedarf Kühlen auf Gemeindeebene, A1B 2050 Status Quo

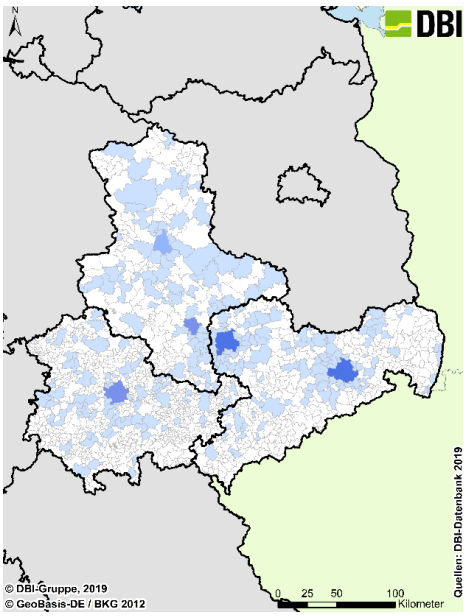
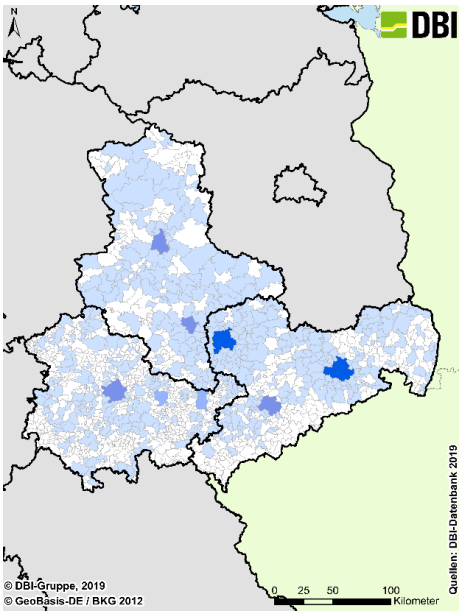
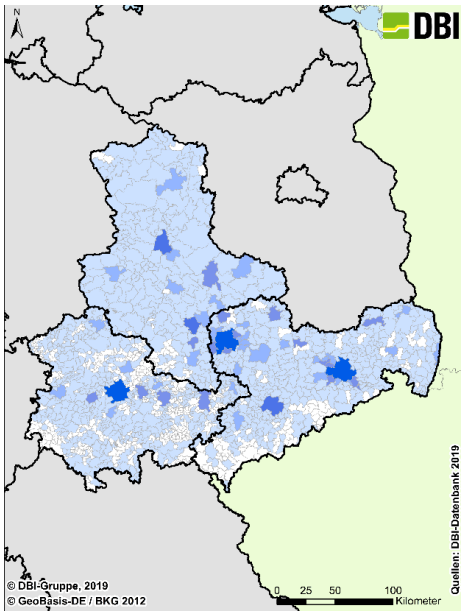


Abbildung 19: Gegenüberstellung der szenarienabhängigen prognostizierten Erdgasbedarfe (Kühlen) für 2030 und 2050 für den Emissionspfad A1B [eigene Darstellung]

Erdgasbedarf Kühlen auf Gemeindeebene, A2 2030 optimistischer Trend



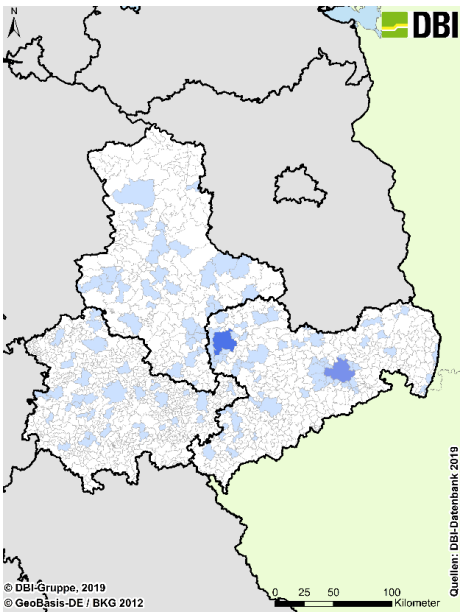
Erdgasbedarf Kühlen auf Gemeindeebene, A2 2050 optimistischer Trend



Erdgasbedarf in MWh/a

kein Erdgasbedarf	1.000 bis 3.000
0 bis 500	3.000 bis 8.000
500 bis 1.000	über 8.000

Erdgasbedarf Kühlen auf Gemeindeebene, A2 2030 Status Quo



Erdgasbedarf Kühlen auf Gemeindeebene, A2 2050 Status Quo

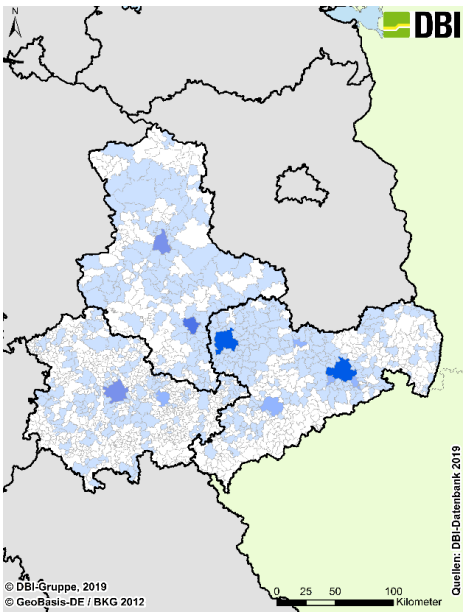


Abbildung 20: Gegenüberstellung der szenarienabhängigen prognostizierten Erdgasbedarfe (Kühlen) für 2030 und 2050 für den Emissionspfad A2 [eigene Darstellung]

6.3 Auswertung und Gegenüberstellung des gesamtheitlichen häuslichen Erdgas- und Primärenergiebedarfes

6.3.1 Zusammenfassung der Erdgasbedarfe

Zusammenfassend soll an dieser Stelle eine Darstellung der Ergebnisse der Erdgasprognosen für Heizen und Kühlen folgen. Abbildung 21 und Abbildung 22 fassen die Berechnungsergebnisse für je ein Emissionsszenario zusammen.

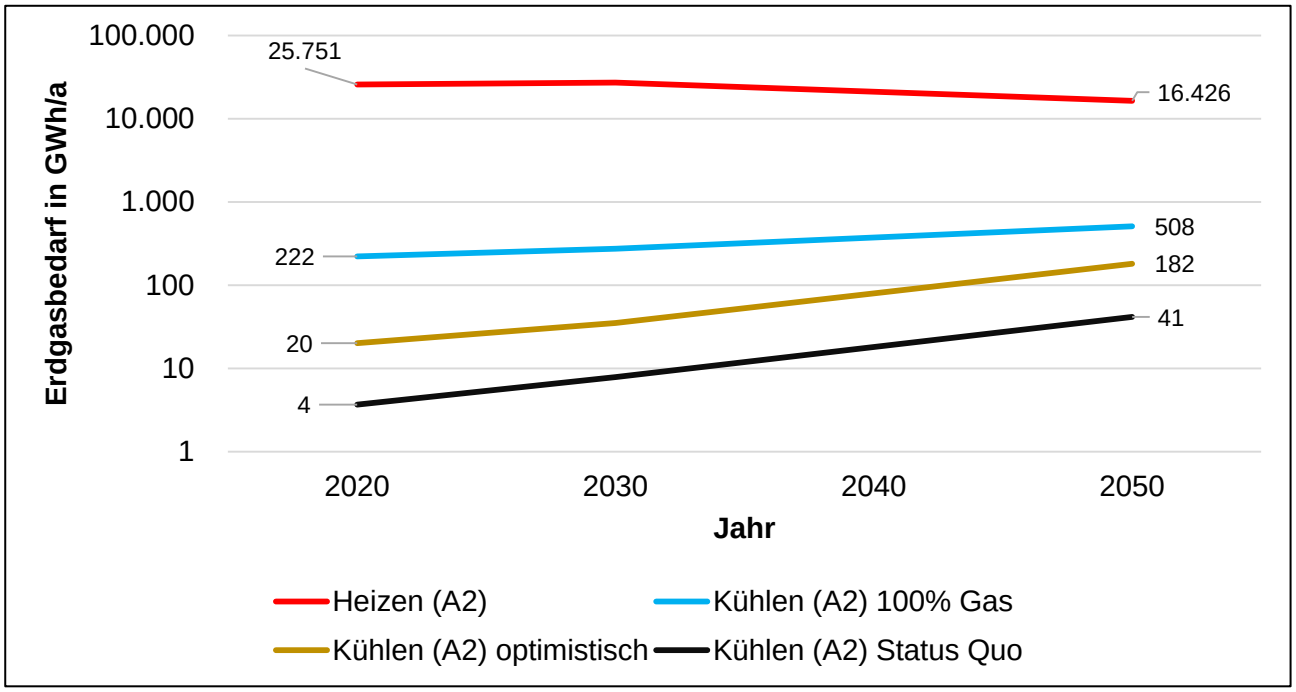


Abbildung 21: Aktueller und zukünftiger Erdgasbedarf für das Emissionsszenario A2 [eigene Berechnung]

Die gemeinsame Darstellung des Erdgasbedarfs aus dem Heiz- und Kühlfall zeigt, dass 2030 und 2050 gegenüber 2020 mit einem leicht steigenden Erdgasbedarf zu rechnen ist. Bis 2050 nimmt dieser jedoch wieder ab. Ein Teil des Erdgases wird hierbei für Kühlung benötigt. Würde der gesamte Kühlbedarf durch Erdgas abgedeckt werden können, so ergäbe sich im Jahr 2050 ein theoretischer Bedarf von rund 500 GWh/a, was einem Anteil von rund 3 % an der kombinierten Gasnachfrage bedeuten würde. Unter Annahme optimistischer und realistischer Entwicklungen der Anlagentechnik und der Marktsituation wären davon nur rund 180 bzw. 42 GWh/a tatsächlich nachgefragt. Dies entspräche einem Anteil von rund 1 % bzw. 0,2 % am kombinierten Gasverbrauch. Abbildung 22 zeigt die Ergebnisse für das Emissionsszenario A1B.

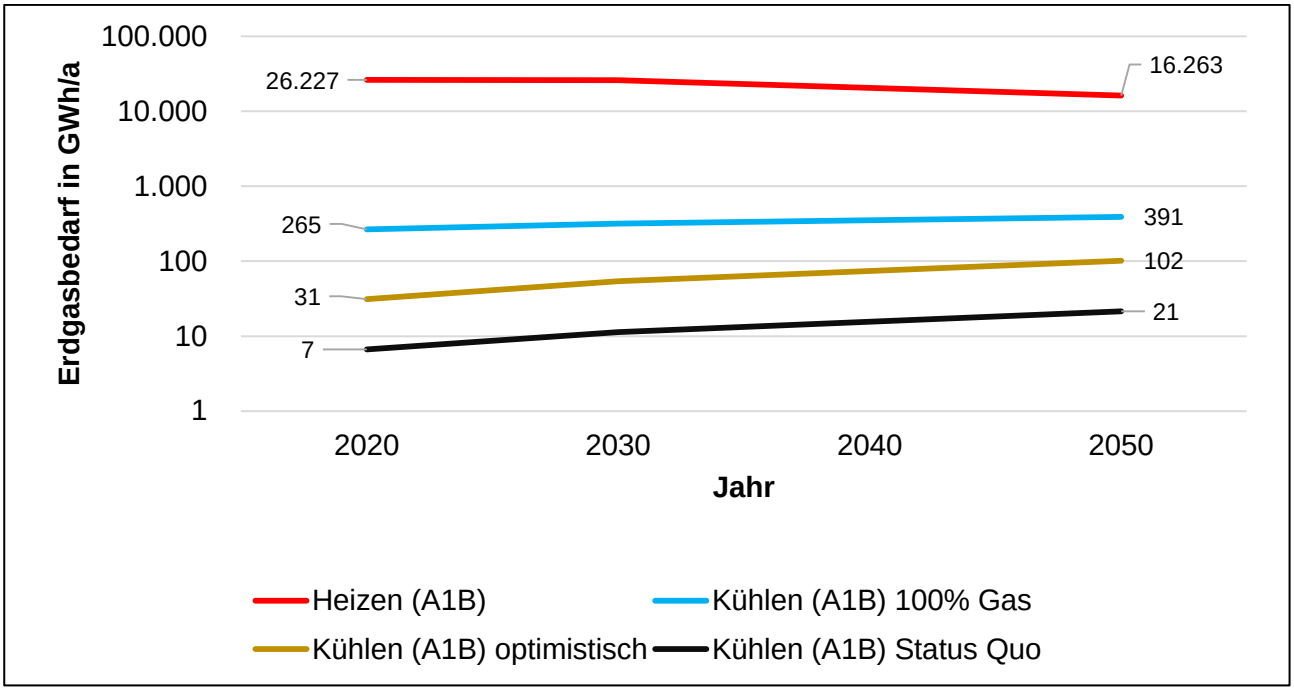


Abbildung 22: Aktueller und zukünftiger Erdgasbedarf für das Emissionsszenario A1B [eigene Berechnungen]

Bei diesem Emissionspfad liegen die Bedarfe für den Kühlfall 2020 und 2030 zunächst höher als auf dem A1B-Pfad. Im Jahr 2050 sind sie jedoch geringer als auf dem Pfad A2. Es ergeben sich die gleichen Schlussfolgerungen in Bezug auf die relative Bedeutung des Kühlfalls für den zukünftigen Erdgasbedarf wie im Szenario A2.

6.3.2 Primärenergetische Evaluierung der Energiebedarfe

Die Szenarien „100% Kühlen mit Strom“ und „100% Kühlen mit Gas“ wurden auf Basis des Kühlbedarfs berechnet. Dafür wurde dieser jeweils durch eine typische Jahresarbeitszahl (Gas 1,2 [20]; Strom 2,5 [19]) geteilt und mit dem entsprechenden Primärenergiefaktor nach [44] (Gas 1,1; Strom 1,8) multipliziert. Der Primärenergiebedarf für die Kühlszenarien „Status Quo“ und „optimistischer Trend“ wurde in Anlehnung an diese Methodik bestimmt. Zunächst wurde der jeweilige Erdgasbedarf ermittelt (vgl. Kapitel 6.2) und direkt mit dem Primärenergiefaktor für Erdgas multipliziert. Zusätzlich wurde mittels GIS berechnet, welcher Anteil des Kühlbedarfs einer Gemeinde durch Gasversorgung gedeckt werden konnte. Die Differenz zum Gesamtkühlbedarf wurde dann durch die Jahresarbeitszahl für Strom geteilt, um den entsprechenden Reststrombedarf zu ermitteln. Dieser wurde wiederum mit dem Primärenergiefaktor für Strom multipliziert. Abbildung 23 zeigt für den Emissionspfad A2 die Primärenergiebedarfe für das Kühlen für verschiedene Technologie-/Marktszenarien.

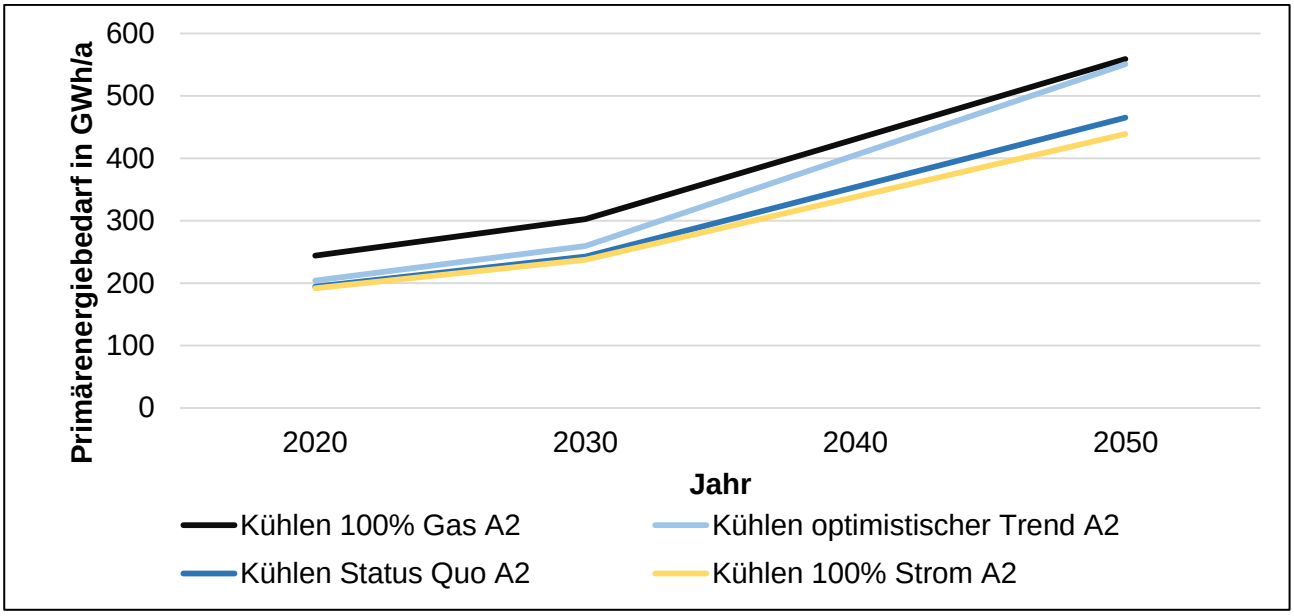


Abbildung 23: Szenarienabhängige Primärenergiebedarfe zur Kühlung für den Emissionspfad A2 [eigene Berechnung]

Von 2020 bis 2050 ist bei diesem Emissionspfad eine Steigerung des Primärenergiebedarfs für das Kühlen von Wohngebäuden in Mitteldeutschland unabhängig vom Technologie-/Marktszenario zu erwarten. Die 100 %-Szenarien Gas und Strom bilden dabei die obere und untere Grenze, zwischen denen die Szenarien „optimistischer Trend“ und „Status Quo“ liegen. Der erwartete Primärenergiebedarf liegt damit 2030 zwischen 240 und 300 GWh/a, im Jahr 2050 zwischen 440 und 560 GWh/a.

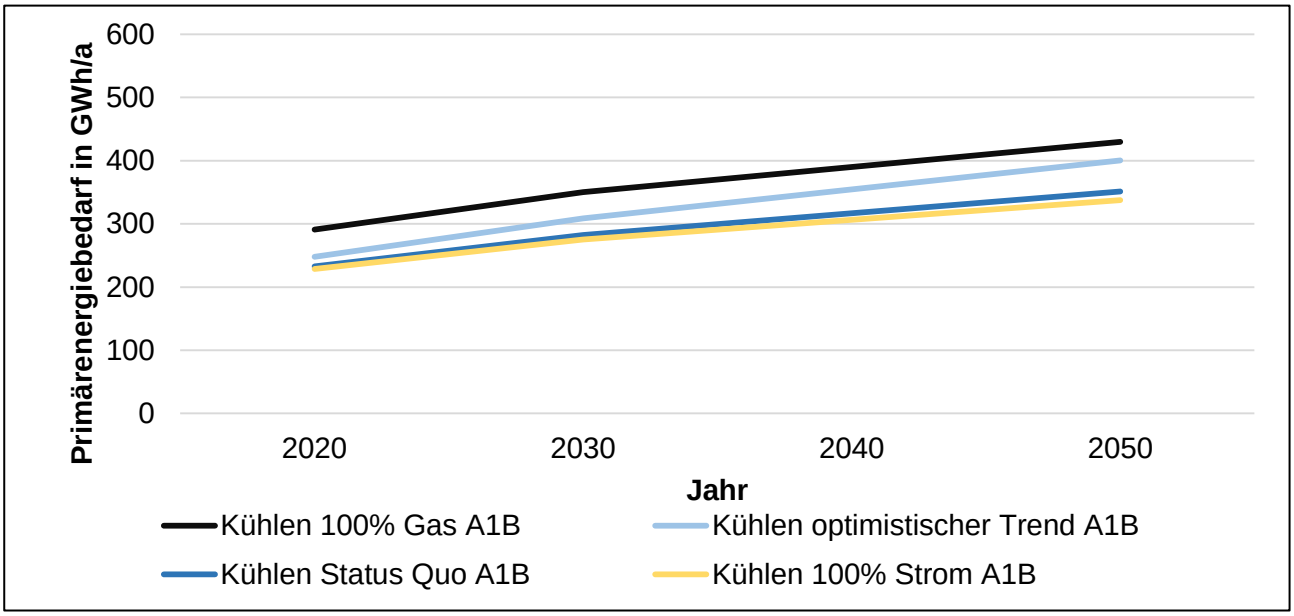


Abbildung 24: Szenarienabhängige Primärenergiebedarfe zur Kühlung für den Emissionspfad A2 [eigene Berechnung]

Ähnliche Schlussfolgerungen lässt der A1B-Emissionspfad zu. Die erwartete Primärenergiemenge unterscheidet sich jedoch leicht. 2030 werden hier 275 bis 350 GWh/a erwartet, im Jahr 2050 sind es 335 bis maximal 430 GWh/a, je nach Technologie- bzw. Marktszenario.

Für klassische strombetriebene Klimatechnik kann eine durchschnittliche Jahresarbeitszahl von rund 2,5 angenommen werden, für gasbetriebene Klimatechnik (aktuell) nur ein Wert von 1,2. Im Falle der verwendeten Referenzanlagen liegt dieser Wert sogar noch niedriger. Zwar hat Gas einen niedrigeren Primärenergiefaktor als Strom (aktuell 1,1 statt 1,8), dieser Vorteil kann jedoch durch die Anlagentechnik zurzeit nicht ausgespielt werden. Primärenergetisch in Bezug auf das Erreichen der Klimaziele ist eine Kühlung mit Strom folglich zu bevorzugen.

Allerdings müssen diese Primärenergiebedarfe in einen Kontext gesetzt werden. Abbildung 25 zeigt daher den Vergleich zwischen eingesetzter Primärenergie für das Heizen und Kühlen.

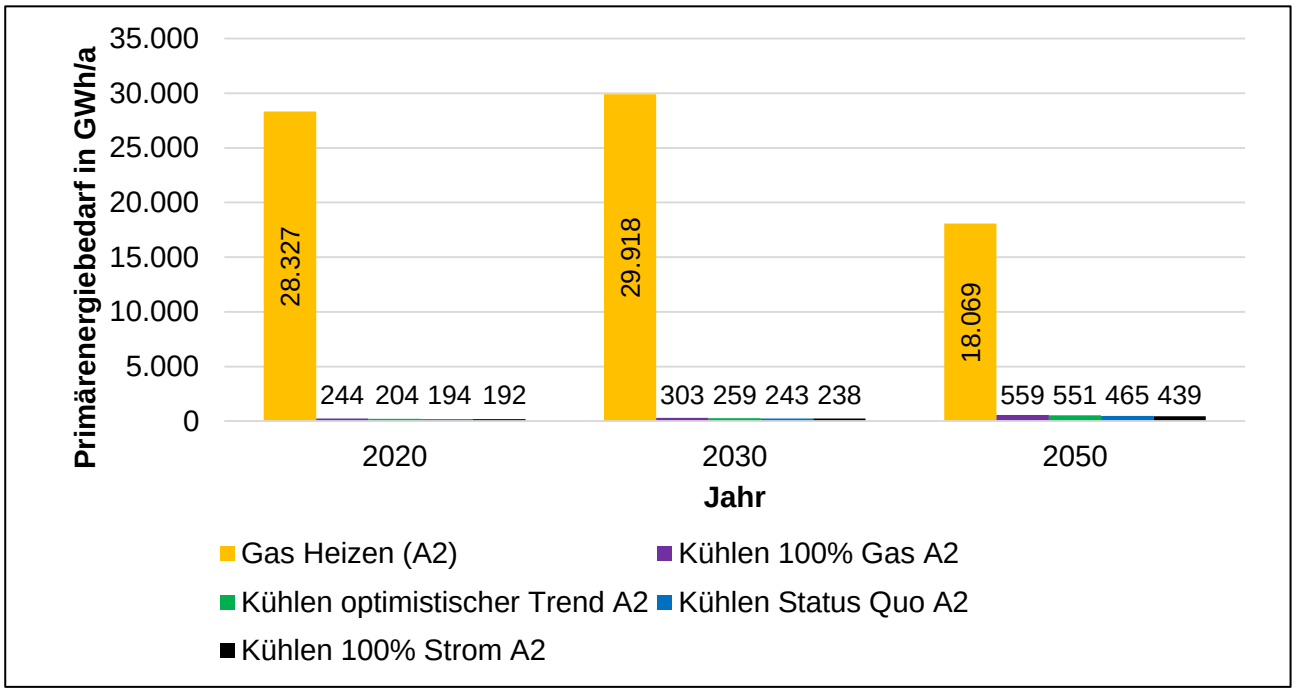


Abbildung 25: Vergleich der eingesetzten Primärenergie für den Heiz- und Kühlfall im A2 Emissionspfad [eigene Berechnung]

Deutlich wird, dass dem Primärenergiebedarf aus dem Kühlen von Gebäuden zukünftig zwar eine größere Rolle zukommen wird. Allerdings wird diese voraussichtlich auch im Jahr 2050 gegenüber dem Primärenergiebedarf aus dem Heizen eine untergeordnete Rolle spielen. Selbst bei einer 100 %-igen Erzeugung von Kälte aus gasbetriebenen Anlagen würde 2050 der Primärenergiebedarf für das Kühlen um einen Faktor 30 kleiner sein als der Primärenergiebedarf für das Heizen. Letzterer wird im Jahr 2050 voraussichtlich rund 35 % geringer sein als im Jahr 2020. Für die Szenarien „optimistischer Trend“ und „Status Quo“ ergibt sich eine noch geringere Bedeutung des Kühlfalls.

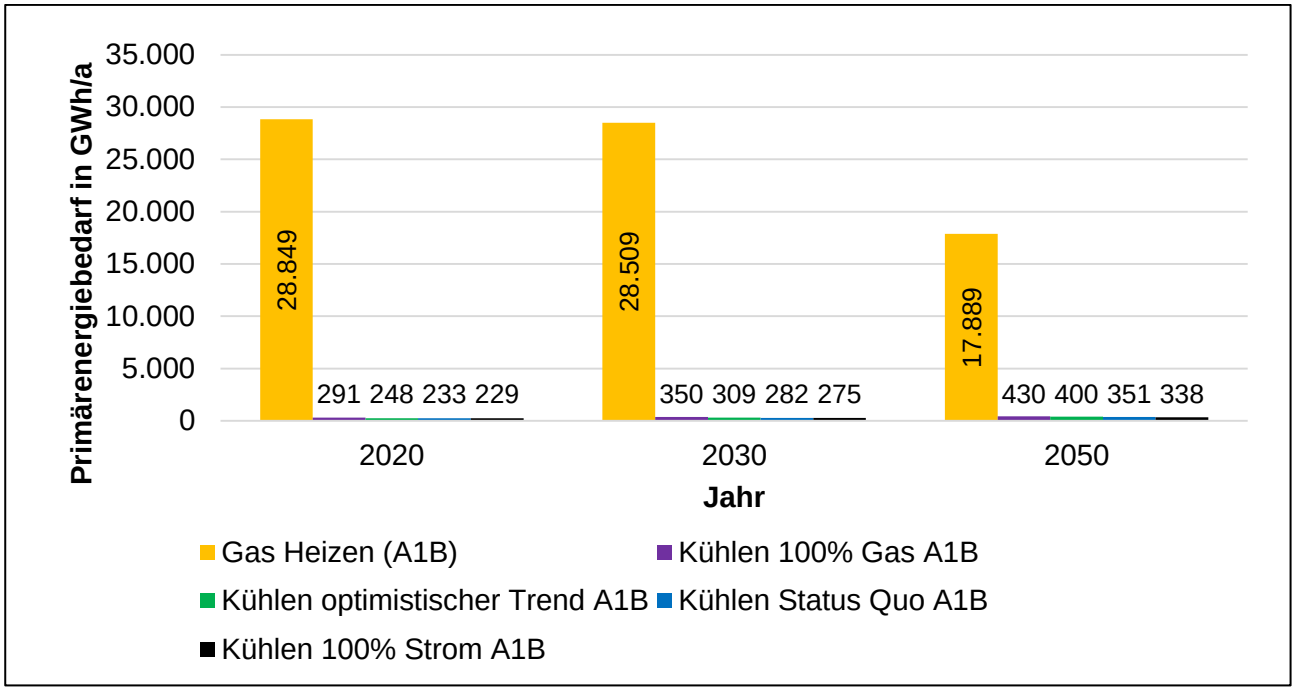


Abbildung 26: Vergleich der eingesetzten Primärenergie für den Heiz- und Kühlfall im A1B Emissionspfad [eigene Berechnung]

Vergleichbare Ergebnisse ergeben sich bei Betrachtung des A1B-Emissionspfades. Für die relative Bedeutung ergeben sich ein Faktor von rund 40 im Jahr 2050, sowie ein Primärenergierückgang von rund 37 %.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass primärenergetisch betrachtet der zukünftig steigende Kühlbedarf vermutlich für die Erdgasversorgung wenig ins Gewicht fallen wird. Vielmehr wird der sinkende Heizbedarf zu einem Absinken des Erdgasbedarfes führen.

7 Fazit

Der Klimawandel sorgt für tiefgreifende klimatische Veränderungen. Globale Klimamodelle prognostizieren dabei für Deutschland und die betrachteten Bundesländer Sachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt steigende Jahresmitteltemperaturen voraus. Die genaue Größenordnung des Temperaturanstieges unterscheidet sich jedoch je nach Modell. Vor diesem Hintergrund wird der Wärmebedarf von Wohngebäuden in den nächsten Jahrzehnten sinken, gleichzeitig jedoch der Kühlbedarf steigen.

Zur Kühlung von Wohngebäuden werden aktuell vor allem elektrisch betriebene Kompressionskältemaschinen und seltener thermisch angetriebene Absorptionskältemaschinen eingesetzt. Gasbetriebene Anlagen haben dabei aktuell nur eine sehr geringe Marktdurchdringung. Im Wohnsektor sind sie aufgrund zu großer Leistungsklassen kaum zu finden. Die Prognosen zeigen, dass zukünftig mit einer steigenden Anzahl kleiner, dezentraler Klimageräte zu rechnen ist. Damit erdgasbetriebene Kälteanlagen den Entwicklungsvorteil strombasierter Anlagen einholen können, sind weitere Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen für diese notwendig – insbesondere im kleinen Leistungsbereich. Zusätzlich sind der Wirkungsgrad und die Wirtschaftlichkeit gasbasierter Anlagen zu verbessern. Potenzielle Chancen für eine stärkere Marktdurchdringung gasbasierter Anlagen ergeben sich aus den geringen Betriebskosten aufgrund der Preisdifferenz zwischen Erdgas und Strom. Weiter von Vorteil ist der geringere Einsatz von Primärenergie in gasbasierten Anlagen im Vergleich zu strombetriebenen Klimatisierungstechnologien.

Die vorliegende Analyse zeigt, dass die Mehrheit der Gebäude einen jährlichen Kühlbedarf von unter 300 kWh/a aufweisen. Der Kühlbedarf wird dabei vor allem in städtischen Gebieten steigen. Marktzuwächse in der Gebäudekühlung sind aber eher im Kleinanlagenbereich zu erwarten, der aktuell und zukünftig schlecht durch gasbetriebene Anlagen bedient werden kann.

Bei der Ermittlung des Erdgasbedarfs für Heizzwecke wurden der aktuelle und zukünftig steigende Anteil von Erdgas bei der Wärmeversorgung, der für die Prognosejahre ermittelte (sinkende) Wärmebedarf und der Heizungsnutzungsgrad berücksichtigt. Die errechneten Erdgasverbräuche zur Deckung des Heizenergiebedarfes betragen gegenwärtig ca. 26.200 GWh/a. Basierend auf den Modellanalysen wird dieser im Jahr 2030 bei ca. 25.900 GWh/a liegen. Bis zum Jahr 2050 ist mit einer weiteren (starken) Abnahme des Wärmebedarfs auf ca. 16.200 GWh/a zu rechnen. Dies entspricht einen Rückgang des Heiz-Erdgasbedarfes im Untersuchungsgebiet um bis zu 38 % bis zum Jahr 2050!

Zur Bestimmung des kühlseitigen Erdgasbedarfs wurden die Kennwerte der repräsentativ ausgewählten Anlagen und der zuvor modellierte Kühlbedarf berücksichtigt. Für eine Potentialabschätzung wurden vier Szenarien definiert: Kühlen nur mit Erdgas, Kühlen nur mit Strom, Status Quo und optimistischer Trend. Die modellierten Erdgasverbräuche schwanken somit je Szenario, steigen jedoch szenarienunabhängig für die nächsten Jahre stetig an. Die maximal modellierten Erdgasverbräuche für das Kühlen liegen gegenwärtig bei ca. 260 GWh/a. Bis 2030 ist so mit einem Zuwachs auf ca. 320 GWh/a zu rechnen. Im Jahr 2050 setzt sich dieser Anstieg auf ca. 350 GWh/a im A1B-Szenario fort, im A2-Szenario liegt der kühlseitige Erdgasbedarf mit ca. 510 GWh/a höher. Bis 2050 wird somit ein Anstieg des Kühl-Erdgasbedarfes um bis zu 90 % erwartet. Nichts desto trotz entspräche dies maximal einem Anteil von rund 3 % am zukünftigen Gasverbrauch für 2050.

Zusammenfassend lässt sich somit festhalten, dass der Erdgasbedarf für das Heizen sinken, wäh-

renddessen der für das Kühlen ansteigen wird. Dieser Trend zeigt sich unabhängig von der Verwendung der klimatischen Emissionsszenarien. Der Anstieg der erdgasseitigen Kühlbedarfe fällt jedoch deutlich geringer aus als die Reduktion der erdgasseitigen Heizbedarfe. Demnach ist die Gesamtentwicklung der Erdgasbedarfe bis 2050 negativ. So sinkt, selbst bei der Annahme einer 100 % erdgasbasierten Kühlung, der kumulierte Erdgasbedarf für Heizen und Kühlen von ca. 26.460 GWh/a bis zum Jahr 2050 auf bis zu 16.550 GWh/a ab.

Die steigenden prognostizierten Kühlbedarfe werden somit nicht das Absinken des Erdgasbedarfs im Bereich der Wärmeversorgung von Wohngebäuden aufwiegen. Für die betrachtete Region Sachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt bleibt somit zusammenfassend festzuhalten, dass bis zum Jahr 2050 ein Rückgang des Erdgasbedarfes um bis zu 37 % möglich ist.

Literaturverzeichnis

[1] Rahmstorf, S. u. Schellnhuber, H.-J.: Der Klimawandel. Diagnose, Prognose, Therapie. Beck'sche Reihe C.-H.-Beck-Wissen, Bd. 2366. München: Verlag C. H. Beck 2007

[2] Brasseur, G., Jacob, D. u. Schuck-Zöller, S. (Hrsg.): Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin: Springer Spektrum 2017

[3] Beck, C.: Ursachen und Auswirkungen des Klimawandels. Folgen für die europäische Wirtschaft. Hamburg: Bachelor + Master Publishing 2014

[4] Kilic, D. I. A.: Analyse und bewertung der internationalen und europaischen rechtspolitik. [Place of publication not identified]: Grin Verlag 2013

[5] Buggisch, W. u. Buggisch, C.: Klima. Tessloff Wissen, Band 125. Nürnberg: Tessloff 2010

[6] Koß, V.: Umweltchemie. Eine Einführung für Studium und Praxis. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg 1997

[7] Stehr, N. u. Storch, H. von: Klima, Wetter, Mensch. Leverkusen-Opladen: Verlag Barbara Budrich 2009

[8] Essl, F. u. Rabitsch, W. (Hrsg.): Biodiversität und Klimawandel. Auswirkungen und Handlungsoptionen für den Naturschutz in Mitteleuropa. Berlin: Springer Spektrum 2013

[9] Wallacher, J. u. Edenhofer, O. (Hrsg.): Klimawandel und globale Armut. Globale Solidarität - Schritte zu einer neuen Weltkultur, Bd. 18. Stuttgart: Kohlhammer 2009

[10] Barbey, K.: Metropolregion im Klimawandel -Räumliche Strategien Klimaschutz und Klimaanpassung. Zur Entwicklung gesamträumlicher Konzepte am Beispiel der Metropolregion Rhein-Neckar. s.l.: KIT Scientific Publishing 2012

[11] Simonis, G. (Hrsg.): Handbuch globale Klimapolitik. UTB Politikwissenschaft, Bd. 8672. Paderborn: Ferdinand Schöningh 2017

[12] Summary for Policymakers. Climate Change 2007, Richard B. Alley, Terje Berntsen, Nathaniel L. Bindoff, Cambridge 2007

[13] Stocker, T. (Hrsg.): Climate change 2013. The physical science basis : Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press 2014

[14] Rein, H. u. Strasdas, W. (Hrsg.): Nachhaltiger Tourismus. Einführung. utb Tourismus, Bd. 4196. Konstanz, Stuttgart: UVK-Verl.-Ges; UTB 2015

[15] Ranke, U.: Klima und Umweltpolitik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2019

[16] Gerstengarbe, F.-W. u. Welzer, H.: Zwei Grad mehr in Deutschland. Wie der Klimawandel unseren Alltag verändern wird. Frankfurt am Main: Fischer E-Books 2013

[17] Klimawandel im Süden Deutschlands. Herausforderungen - Anpassungen, Folgen für die Wasserwirtschaft, LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Würtemmberg, Karlsruhe 2017

[18] Max Planck Institut im Auftrag des Umwelbundesamtes: REMO-UBA. Simulations on 10km horizontal resolution. 2006

[19] Bürger, V. u. Hesse, T.: Klimaneutraler Gebäudebestand 2050 II. Umweltforschungsplan des

Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Bd. 2535. Freiburg: Öko-Institut e.V 2017

[20] Wietschel, M. u. Ullrich, S. J. (Hrsg.): Energietechnologien der Zukunft. Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze. Lehrbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg 2015

[21] Kühlen und Klimatisieren mit Erdgas. Effiziente Klimatisierung im Gewerbe, BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Berlin 2018

[22] Analyse der Vorstudien für Wohnungslüftung und Klimageräte. Veröffentlichung im Rahmen des Projektes "Materialeffizienz und Ressourcenschonung" (MaRess) ISSN 1862-4804, Claus Barthel, M. F., Dessau-Roßlau 2010

[23] Robur S.p.A.: GA ACF. https://www.robureshk.de/kuhler/gas_absorptions_kuehler_acf

[24] KKU CONCEPT GmbH: Wirtschaftliche Kälte aus Erdgas. https://www.kku-concept.de/gasmotorkaeltemaschine/produktangebot/

[25] DBI-Energiedatenbank, DBI - Gastechnologisches Institut gGmbH, 2019

[26] Energiewende-Outlook: Kurzstudie Wärme. Eine Untersuchung verschiedener Strategien zur Sicherstellung einer erfolgreichen Energiewende im Wärmebereich, PricewaterhouseCoopers AG, 2015

[27] Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2013 bis 2015. Studie beauftragt vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Projektnummer: 072/15, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., Berlin 2016

[28] Wie heizt Deutschland? (2019). BDEW Studie zum Heizungsmarkt, BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V., Berlin 2019

[29] Jungbluth, C. H.: Kraft-Wärme-Kopplung mit Brennstoffzellen in Wohngebäuden im zukünftigen Energiesystem. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Dissertation. Schriften des Forschungszentrums Jülich : Reihe Energietechnik, Bd. 59

[30] DIN V 4108-6:2003-06. *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden*

[31] Energie-Einsparverordnung. Ausgabe 2016, Leitfaden für Wohngebäude, Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel im Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e.V., Bonn 2016

[32] Hähnel, F.: Analyse des zukünftigen deutschlandweiten Wärmebedarfs mittels Geoinformationssystem, Hochschule Mittweida Diplomarbeit. Mittweida 2016

[33] Bohne, D.: Technischer Ausbau von Gebäuden. Und nachhaltige Gebäudetechnik. Wiesbaden: Springer Vieweg 2019

[34] Raumtemperatur.Info: Räume richtig kühlen: So können Sie im Sommer die Raumtemperatur senken. https://www.raumtemperatur.info/raeume-kuehlen/#Eine_hochwertige_Daemmung_bzw_Isolierung_haelt_die_Hitze_laenger_draussen, abgerufen am: 20.09.2019

[35] Die Auswirkungen des Klimawandels auf den Heiz- und Kühlenergiebedarf in Österreich II. Endbericht (2. Jahr), Töglhofer, C., Gobiet, A., Habsburg-Lothringen, C., Heimrath, R., Michlmair, M., Prettenthaler, F., Schranzhofer, H., Streicher, W. u. Truhetz, H., 2009

[36] Claus Schlömer, J. H.: Raumordnungsprognose - Haushaltsprognose - Methodik, 2019. https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Raumbeobachtung/UeberRaumbeobachtung/Komponenten/Raumordnungsprognose/Modell/ModellHH.html?nn=444934, abgerufen am: 03.09.2019

[37] Wohnungsmarktprognose 2030. BBSR-Analysen KOMPAKT 07/2015, Tobias Held u. Matthias Waltersbacher, Bonn 2015

[38] Klimatisierungsbedarf und dafür abgerufener Stromverbrauch für Wohngebäude in Deutschland von 2020 bis 2050. Ergebnisse von Arbeitspaket 2 im Projekt „Einbindung des Wärme- und Kältesektors in das Strommarktmodell PowerFlex zur Analyse sektorübergreifender Effekte auf Klimaschutzziele und EE-Integration“, Matthias Koch, Tanja Kenkmann, Christian Winger, Immanuel Stieß, Freiburg 2017

[39] Zarin Pass, R., Wetter, M. u. Piette, M. A.: A thermodynamic analysis of a novel bidirectional district heating and cooling network. Energy 144 (2018), S. 20–30

[40] Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. 24/2015, Umweltbundesamt, 2015

[41] Streck, S.: Nachhaltiges Planen, Bauen und Wohnen. Kriterien für Neubau und Bauen im Bestand. Berlin: Springer Vieweg 2018

[42] Studie. Klimaschutz im Wohngebäudebereich:, Wie können wir die Klimaschutzziele im Bereich der Wohngebäude in Deutschland bis 2050 erreichen?, Dr.Nymoen, H., Graf, K., Niemann, E., Sendler, S. C. u. Kunde, J., Berlin 2017

[43] Wie heizt Deutschland. BDEW Studie zum Heizungsmarkt, BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V., Berlin 2015

[44] DIN V 18599-1:2018-09. *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung*