

CLIMATE CHANGE

54/2025

Erneuerbare Kälte – Methodenentwicklung zur Abbildung der zur Kälteversorgung genutzten erneuerbaren Energie

Abschlussbericht Erneuerbare Kälte

CLIMATE CHANGE 54/2025

EVUPLAN des Bundesministerium für Wirtschaft und
Energie

Forschungskennzahl 37EV 18 102 0
FB001623

Erneuerbare Kälte – Methodenentwicklung zur Abbildung der zur Kälteversorgung genutzten erneuerbaren Energie

Abschlussbericht

von

Marcel Ebert, Robert Kießling
Leipziger Institut für Energie GmbH, Leipzig

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Leipziger Institut für Energie GmbH
Lessingstraße 2
04109 Leipzig

Abschlussdatum:

Oktober 2024

Redaktion:

Fachgebiet V 1.8 Geschäftsstelle der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik
(AGEE-Stat)
Michael Memmler, Fabian Sandau

DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-7582>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Oktober 2025

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Wissenschaftliche Analysen zu ausgewählten Aspekten der Statistik erneuerbarer Energien und zur Unterstützung der AGEE-Stat – Erneuerbare Kälte – Methodenentwicklung zur Abbildung der zur Kälteversorgung genutzten erneuerbaren Energie

Dieser Bericht untersucht die Umsetzbarkeit der in der EU-Richtlinie (EU) 2018/2001 beschriebenen Methode zur Berechnung der für Kälteversorgung und Fernkälte genutzten erneuerbaren Energie mit Fokus auf die nationale Anwendung in Deutschland. Im Kontext des Klimawandels gewinnt die Kälteversorgung an Bedeutung, doch zeigt die Analyse der Datenlage in Deutschland erhebliche Lücken, insbesondere beim Endenergieverbrauch und der Struktur der Kälteversorgungssysteme.

Der Bericht erläutert die EU-Berechnungsvorschrift und klärt zentrale Begriffe und Abgrenzungen. Die Methodik differenziert zwischen Kälteerzeugern unter und über 1,5 MW sowie Fernkälteversorgung, wobei kleinere Anlagen mit Standardwerten berechnet und größere Anlagen sowie Fernkälte durch Messdaten erfasst werden. Da umfassende Daten fehlen, gestaltet sich die Anwendung der Vorschrift statistisch herausfordernd.

Ein entwickeltes Schätz-Modell nutzt Standardwerte zur Anlageneffizienz und umfasst eine vereinfachte Methodik für Fernkälte. Die Analyse konzentriert sich auf die Raumklimatisierung in Wohngebäuden, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und Industrie, wobei modellierte Annahmen durch Expertengespräche validiert wurden.

Die Methodik basiert auf Endenergieverbräuchen und modelliert den Kältebedarf mithilfe saisonaler Effizienzparameter und mittlerer Kühlgradtage. Die Ergebnisse zeigen, dass Gewerbe, Handel und Dienstleistungen den größten Anteil an erneuerbarer Kälte aufweisen. Abschließend wurden die Schätzungen mit europäischen Daten verglichen und eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt.

Abstract: Scientific analyses on selected aspects of renewable energy statistics and in support of the AGEE-Stat - Renewable cooling - development of methods to map the renewable energy used for cooling supply

This report analyses the feasibility of the method described in EU Directive (EU) 2018/2001 for calculating the renewable energy used for cooling supply and district cooling with a focus on national application in Germany. In the context of climate change, cooling supply is becoming increasingly important, but the analysis of the data situation in Germany shows considerable gaps, especially in terms of final energy consumption and the structure of cooling supply systems.

The report explains the EU calculation rule and clarifies key terms and definitions. The methodology differentiates between cooling generators below and above 1.5 MW and district cooling supply, whereby smaller systems are calculated using standard values and larger systems and district cooling are recorded using measurement data. Due to the lack of comprehensive data, the application of the regulation is statistically challenging.

An estimation model developed uses default values for system efficiency and includes a simplified methodology for district cooling. The analysis focuses on air conditioning in residential, commercial, retail, services and industrial buildings, with modelled assumptions validated through expert interviews.

The methodology is based on final energy consumption and models cooling demand using seasonal efficiency parameters and average cooling degree days. The results show that trade, commerce and services have the largest share of renewable cooling. Finally, the estimates were compared with European data and a sensitivity analysis was carried out.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	7
Tabellenverzeichnis	8
Abkürzungsverzeichnis	10
Zusammenfassung.....	11
Summary	13
1 Einleitung.....	15
2 Datengrundlage zur Kälteversorgung in Deutschland.....	16
3 Richtlinie (EU) 2018/2001 Anhang VII	22
3.1 Relevanz	22
3.2 Begriffsbestimmungen.....	23
3.3 Anwendungsbereich	24
3.4 Identifikation relevanter Kühlanwendungen.....	26
3.5 Methodisches Vorgehen zur Quantifizierung der erneuerbaren Kälte	30
3.5.1 Kälterzeuger unter 1,5 MW	30
3.5.2 Kälterzeuger über 1,5 MW.....	35
3.5.3 Fernkälteversorgung	36
3.6 Anzustrebende Ergebnisstruktur	36
4 Methodenentwicklung zur Abbildung der erneuerbaren Kälte	38
4.1 Anwendungsbereich der Methodik	38
4.2 Raumklimatisierung	39
4.2.1 Methodik.....	40
4.2.2 Diskussion der Ergebnisse.....	48
4.3 Fernkälteversorgung	53
4.3.1 Methodik.....	54
4.3.2 Diskussion der Ergebnisse.....	56
5 Fazit für Deutschland.....	58
6 Quellenverzeichnis	60

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Abschätzungsergebnisse für die zur Kälteversorgung genutzten erneuerbaren Energie in den Verbrauchssektoren und der Fernkälteversorgung.....	12
Abbildung 2:	Estimation results for the renewable energy used for cooling supply in the consumption sectors and district cooling supply	14
Abbildung 2:	Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte in den Verbrauchssektoren	17
Abbildung 3:	Vergleich ausgewählter Studienergebnisse für den Endenergieverbrauch der Kälteversorgung in den Verbrauchssektoren und der Klimatisierung.....	18
Abbildung 4:	Kältebedarf und Endenergieverbrauch der Kälteversorgung in den Verbrauchssektoren	19
Abbildung 5:	Endenergieverbrauch der Kälteversorgung differenziert nach Klimatisierung und Prozesskälte für die Länder Frankreich und Deutschland.....	20
Abbildung 6:	Regionalisierte Betrachtung der Kühlgradtage in Deutschland	21
Abbildung 7:	Gliederung zur Berechnung der erneuerbaren Kälte	30
Abbildung 8:	Ergebnisse für die Abschätzung der erneuerbaren Kälte in den Verbrauchssektoren	48
Abbildung 9:	Erneuerbare Kälte in der Raumklimatisierung (Wohngebäude) ausgewählter Mitgliedsstaaten im Vergleich zum Abschätzungsergebnis	49
Abbildung 10:	Erneuerbare Kälte in der Raumklimatisierung des GHD-Sektors ausgewählter Mitgliedsstaaten im Vergleich zum Abschätzungsergebnis	50
Abbildung 11:	Jahreszeitbedingte Primärleistungsfaktoren im GHD-Sektor ausgewählter Mitgliedsstaaten im Vergleich zum Abschätzungsergebnis	51
Abbildung 12:	Ergebnis der Sensitivitätsanalyse	53
Abbildung 13:	Erneuerbare Kälte in der Fernkälteversorgung ausgewählter Mitgliedsstaaten im Vergleich zum Abschätzungsergebnis	56
Abbildung 14:	Vergleich des Abschätzungsergebnisses mit der Datenmeldung zur erneuerbaren Kälte von anderen Mitgliedsstaaten	59

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Jahresdurchschnittstemperatur ausgewählter Mitgliedstaaten der EU für 2022 (Climate Change Knowledge Portal 2024).....	22
Tabelle 2:	Betrachtung der Anwendungsbereiche hinsichtlich ihrer Relevanz für die erneuerbare Kälte unter Einbezug der Bedarfstemperaturen (Heinrich et al. 2014)	27
Tabelle 3:	Betrachtung der Anwendungsbereiche hinsichtlich ihrer Relevanz für die erneuerbare Kälte (Preuß 2019).....	28
Tabelle 4:	Branchen der Prozesskühlung, die der Abwärmenutzung vorbehalten sind (Lyons et al. 2021)	29
Tabelle 5:	Anforderungen an die Mindestenergieeffizienz von Raumklimageräten ($\leq 12 \text{ kW}$)	31
Tabelle 6:	Jahreszeitbedingter Primärleistungsfaktor von Raumklimageräten ($\leq 12 \text{ kW}$)	32
Tabelle 7:	Anforderungen an die Mindestenergieeffizienz von Prozesskühlern mit hoher Betriebstemperatur (SEPR)	32
Tabelle 8:	Jahreszeitbedingte Primärleistungsfaktoren von Prozesskühlern mit hoher Betriebstemperatur (SPF_p)	33
Tabelle 9:	Raumkühlungs-Jahresnutzungsgrad $\eta_{s,c}$ und jahreszeitbedingter Primärleistungsfaktor SPF_p für verschiedene Kühlungsprodukte.....	34
Tabelle 10:	Endenergieverbrauch Klimatisierung (nur Strom) gemäß Anwendungsbilanzen für die Verbrauchssektoren Wohngebäude, GHD und Industrie (AGEB 2023).....	41
Tabelle 11:	Endenergieverbrauch Klimatisierung (nur Strom) für die Verbrauchssektoren abzüglich der Kälteerzeuger mit einem $\text{SPF}_p < 1,4$	41
Tabelle 12:	Berechnung des Kältebedarfs in den Verbrauchssektoren basierend auf dem bereinigten Endenergieverbrauch.....	42
Tabelle 13:	Kältebedarf in den Verbrauchssektoren abzüglich der durch Fernkälteversorgung bereitgestellten Kühlenergie.....	42
Tabelle 14:	Berechnung des mit einer Nennkühlleistung von unter 1,5 MW bereitgestellten Kältebedarfs in den Verbrauchssektoren	43
Tabelle 15:	Mittelwert Kühlgradtage, Kühlgradtage in den Betrachtungsjahren, äquivalente Vollaststunden in den Verbrauchssektoren	44
Tabelle 16:	Berechnung der installierten Leistung von Kälteversorgungssystemen in den Verbrauchssektoren	44
Tabelle 17:	Berechnung des witterungsabhängigen Kältebedarfs in den Verbrauchssektoren	45
Tabelle 18:	Jahreszeitbedingter Primärleistungsfaktor mobiler Raumklimageräte (Pezutto et al. 2021).....	45

Tabelle 19:	Prozentuale Verteilung der Anlagenarten in den Verbrauchssektoren in Relation zum Endenergiebedarf	46
Tabelle 20:	Anlagenverteilung stationären Raumklimageräte (< 12 kW) in Abhängigkeit von ihrer Nennkühlleistung und dem GWP des Kühlmittels.....	47
Tabelle 21:	Jahreszeitbedingte Primärleistungsfaktoren und der sich daraus ergebende Anteil der erneuerbaren Energie für die Verbrauchssektoren	47
Tabelle 22:	Berechnung der erneuerbaren Kälte für die Verbrauchssektoren	48
Tabelle 23:	Fernkältenetze in Deutschland (AGFW 2023)	54
Tabelle 24:	Berechnungsergebnisse der Vorbetrachtungen zur leitungsgebundenen Nettokälteversorgung mittels Kompressionskältemaschinen in Deutschland	55
Tabelle 25:	Arbeitszahl im Kühlbetrieb (SEER) von Kälteerzeugern europäischer Fernkältenetze in Abhängigkeit von den klimatischen Bedingungen (Pezutto et al. 2022).....	55
Tabelle 26:	Berechnungsergebnisse für die Betrachtung der erneuerbaren Energie in der Fernkälteversorgung	56
Tabelle 27:	Nutzbare Kälteabgabe ausgewählter Mitgliedsstaaten in der Fernkälteversorgung für das Betrachtungsjahr 2016 (Pezutto et al. 2022)	57
Tabelle 28:	Jahreszeitbedingte Primärleistungsfaktoren ausgewählter Mitgliedsstaaten in der Fernkälteversorgung für das Betrachtungsjahr 2021 (Pezutto et al. 2022)	57

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.
AGEE-Stat	Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energien-Statistik
AGFW	AGFW Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.
CDD	Kühlgradtage (Cooling degree days)
d	Tag
EER_{rated}	Nenn-Leistungszahl im Kühlbetrieb (Energy Efficiency Ratio)
EFLH	Äquivalente Vollaststunden (Equivalent full load hours)
EU	Europäische Union
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
GWh	Gigawattstunden
GWP	Global Warming Potential
H₂O	Wasser
ILK	Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH
JRC	Gemeinsame Forschungsstelle (Joint Research Centre)
K	Kelvin
KKM	Kompressionskältemaschinen
km	Kilometer
kW	Kilowatt
LKW	Lastkraftwagen
MW	Megawatt
η	Primärenergiefaktor
η_{s,c}	Raumkühlungs-Jahresnutzungsgrad
NH₃	Ammoniak
P_c	Nennkühlleistung
PKW	Personenkraftwagen
SEER	Arbeitszahl im Kühlbetrieb (Seasonal Energy Efficiency Ratio)
SEPR	Jahresarbeitszahl (Seasonal Energy Performance Ratio)
SHARES	Short Assesment of Renewable Energy Sources
SKM	Sorptionskältemaschinen
SPF_p	Jahreszeitbedingter Primärleistungsfaktor
TWh	Terawattstunden
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.

Zusammenfassung

Im vorliegenden Fachbericht wurde die „Methode zur Berechnung der Menge der für die Kälteversorgung und die Fernkälteversorgung genutzten erneuerbaren Energie“ aus Anhang VII der Richtlinie (EU) 2018/2001 mit Blick auf ihre nationale Umsetzbarkeit für Deutschland analysiert (EU COM 2021). Durch die Einführung der Richtlinie ermöglicht die Europäische Kommission den Mitgliedsstaaten, ihren Anteil an erneuerbarer Energie in der Kälteversorgung auf die Ziele der Europäischen Union anzuwenden. Angesichts der klimatischen Veränderungen wird die Kälteversorgung zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Zunächst wurde im Rahmen einer umfassenden Literaturrecherche die Datenbasis zur Kälteversorgung in Deutschland analysiert. Dabei wurde festgestellt, dass der Kenntnisstand zum Endenergieverbrauch der Kälteversorgung sowie zur Art und Anzahl der Kälteversorgungssysteme nicht gesichert ist. Zudem werden in den einschlägigen Veröffentlichungen häufig unterschiedliche Unterteilungen der verbrauchsrelevanten Sektoren getroffen, sodass sich die daraus resultierenden Abschätzungen stark voneinander abweichen.

Im Anschluss wurde die Berechnungsvorschrift der Europäischen Kommission detailliert beschrieben. Hierbei erfolgte zunächst die Erläuterung der relevanten Begriffsbestimmungen und die beschreibende Klarstellung der abzugrenzenden Anwendungsbereiche im Sinne der Richtlinie. Auf Basis dieser Abgrenzungen und der Studien zur sektoralen Betrachtung des Energieverbrauchs in der Kälteversorgung konnten die für die Berechnung der erneuerbaren Kälte relevanten Anwendungsbereiche identifiziert werden.

Darüber hinaus wurde die Methodik der Berechnungsvorschrift umfassend beschrieben. Ein besonders relevanter Punkt ist hierbei die Unterteilung der Betrachtung von Kälteversorgungssystemen in Kälteerzeuger mit einer Nennkühlleistung unter 1,5 MW, Kälteerzeuger mit einer Nennkühlleistung über 1,5 MW und der Fernkälteversorgung. Während für Kälteerzeuger (< 1,5 MW) ein vereinfachter Berechnungsansatz auf Basis von Standardwerten für die Anlageneffizienzen möglich ist, können die übrigen Bereiche lediglich unter Anwendung von Messdaten angerechnet werden. Besonderes Augenmerk wurde in diesem Abschnitt auf die Herleitung der Standardwerte für die Anlageneffizienz gemäß der Ökodesign-Richtlinien gelegt.

Auf Basis dieser Vorbetrachtungen wurde die Schlussfolgerung gezogen, dass die Berechnungsvorschrift der Europäischen Kommission in Deutschland energiestatistisch herausfordernd ist. In den Bereichen der Kälteversorgung, die nur unter Anwendung von Messdaten anrechenbar sind, findet gegenwärtig keine umfassende Erhebung von Messdaten statt. Für den Bereich der Kälteversorgung, der vereinfacht unter Anwendung von Standardwerten für die Anlageneffizienz betrachtet werden kann, fehlt eine flächendeckende Erhebung der Nennkühlleistung des Anlagenbestandes.

Im Rahmen des Vorhabens wurde trotz der genannten Schwierigkeiten ein Schätz-Modell für die Betrachtung der zur Kälteversorgung genutzten erneuerbaren Energie auf Basis von Standardwerten für die Anlageneffizienz entwickelt. Darüber hinaus wurde eine vereinfachte Methodik zur Berücksichtigung erneuerbarer Energien zur Fernkälteerzeugung in Deutschland ergänzt. Aufgrund vielfältiger Herausforderungen bei der Abgrenzung der Anwendungsbereiche wurde sich auf die Betrachtung der Raumklimatisierung in den Verbrauchssektoren Wohngebäude, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) sowie Industrie beschränkt. Aufgrund der lückenhaften Datenbasis zur Kälteversorgung in Deutschland mussten für die Eingangsparameter der Modellierung verschiedene Annahmen getroffen werden. Zur Qualitätssicherung der vorliegenden Methodik wurden entsprechende Annahmen im Rahmen

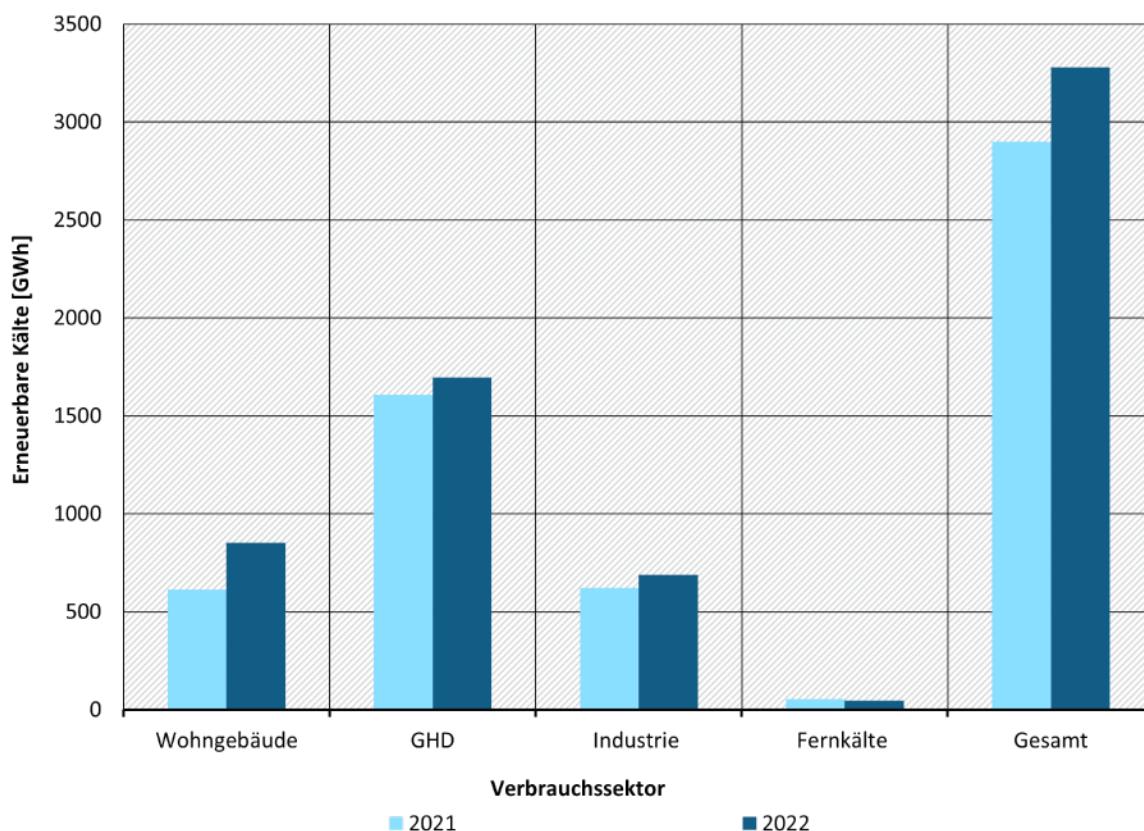
von Fachinterviews mit Forschenden aus den Bereichen Kältetechnik und Energiestatistik validiert.

Ausgangspunkt der entwickelten Methodik sind die Endenergieverbräuche für die Klimatisierung auf Basis der Anwendungsbilanzen der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen. Um die fehlende Erhebung der installierten Nennkühlleistung in den Verbrauchssektoren zu kompensieren, wurde auf Basis saisonaler Effizienzparameter ein Kältebedarf modelliert. Zusätzlich wurden die Kühlgradtage der letzten 10 Jahre gemittelt, um auf dieser Basis sektorspezifische äquivalente Vollaststunden zu berechnen. Aus der Kombination von Kältebedarf und äquivalenten Vollaststunden ergibt sich eine Abschätzung der installierten Nennkühlleistung in den Verbrauchssektoren. Die weiteren Berechnungsschritte zur Abschätzung der erneuerbaren Kälte entsprechen der Berechnungsvorschrift der Europäischen Kommission.

Die Ergebnisse der Abschätzung wurden kritisch diskutiert und mit den bisherigen Datenmeldungen europäischer Mitgliedsstaaten zur erneuerbaren Kälte verglichen. Darüber hinaus wurde eine Sensitivitätsanalyse für ausgewählte Eingangsparameter der Abschätzung durchgeführt.

Abschließend ergab sich das folgende Bild im Hinblick auf die Endergebnisse der Abschätzung der zur Kälteversorgung genutzten erneuerbaren Energie für die Betrachtungsjahre 2021 und 2022. Es wird deutlich, dass der Verbrauchssektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen den größten Anteil an der erneuerbaren Kälte ausmacht.

Abbildung 1: Abschätzungsergebnisse für die zur Kälteversorgung genutzten erneuerbaren Energie in den Verbrauchssektoren und der Fernkälteversorgung



Quelle: [Eigene Darstellung auf Basis von Berechnungen des IE Leipzig]

Summary

In this report, the 'Method for calculating the amount of renewable energy used for cooling and district cooling' from Annex VII of Directive (EU) 2018/2001 was analysed with regard to its national feasibility for Germany (EU COM 2021). By introducing the directive, the European Commission is enabling member states to apply their share of renewable energy in the cooling supply to the European Union's targets. In view of climate change, the supply of cooling energy will become increasingly important.

First of all, the database on cooling supply in Germany was analysed as part of a comprehensive literature review. It was found that the state of knowledge on the final energy consumption of the cooling supply and on the type and number of cooling supply systems is not reliable. In addition, the relevant publications often categorise the consumption-relevant sectors differently, so that the resulting estimates differ greatly.

The European Commission's calculation rule was then described in detail. Firstly, the relevant definitions and the descriptive clarification of the areas of application to be delimited within the meaning of the Directive were explained. Based on these definitions and the studies on the sectoral consideration of energy consumption in the cooling supply, the relevant application areas for the calculation of renewable cooling were identified.

In addition, the methodology of the calculation rule was described in detail. A particularly relevant point here is the subdivision of the consideration of cooling supply systems into cooling generators with a nominal cooling capacity of less than 1.5 MW, cooling generators with a nominal cooling capacity of more than 1.5 MW and district cooling supply. While a simplified calculation approach based on standard values for the system efficiencies is possible for cooling generators (< 1.5 MW), the other areas can only be taken into account using measured data. In this section, particular attention was paid to the derivation of the standard values for system efficiency in accordance with the Ecodesign Directive.

On the basis of these preliminary considerations, it was concluded that the European Commission's calculation rule in Germany is challenging in terms of energy statistics. There is currently no comprehensive collection of measurement data in the areas of cooling supply that can only be counted using measurement data. For the area of cooling supply, which can be considered in a simplified manner using standard values for system efficiency, there is no comprehensive survey of the nominal cooling capacity of the existing systems.

Despite the difficulties mentioned, the project developed an estimation model for analysing the renewable energy used for cooling supply on the basis of standard values for system efficiency. In addition, a simplified methodology for the consideration of renewable energies for district cooling generation in Germany was added. Due to the many challenges involved in defining the areas of application, the analysis was limited to room air conditioning in the consumption sectors of residential buildings, trade, commerce and services (TCS) and industry. Due to the incomplete database on cooling supply in Germany, various assumptions had to be made for the input parameters of the modelling. To ensure the quality of this methodology, corresponding assumptions were validated in the course of expert interviews with researchers from the fields of refrigeration technology and energy statistics.

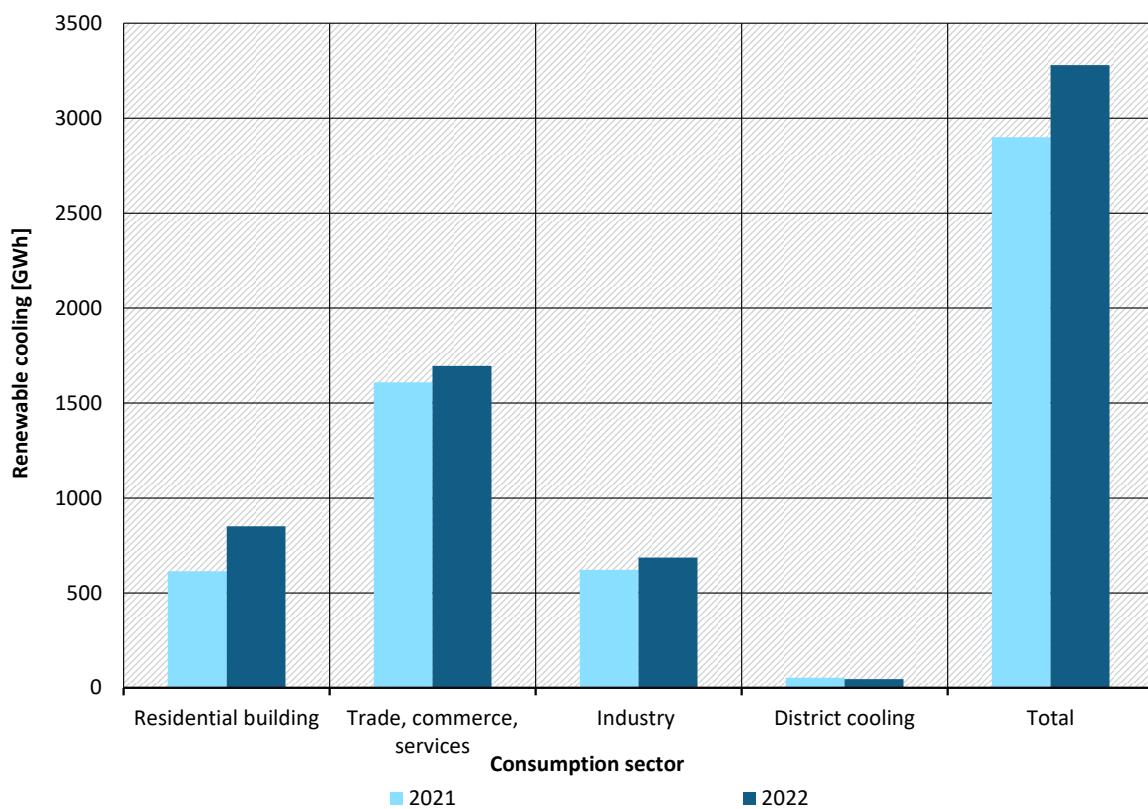
The starting point for the methodology developed is the final energy consumption for air conditioning based on the application balances of the Working Group on Energy Balances. In order to compensate for the lack of data on installed nominal cooling capacity in the consumption sectors, a cooling demand was modelled on the basis of seasonal efficiency parameters. In addition, the cooling degree days of the last 10 years were averaged in order to

calculate sector-specific equivalent full load hours on this basis. The combination of cooling demand and equivalent full load hours results in an estimate of the installed nominal cooling capacity in the consumption sectors. The further calculation steps for estimating renewable cooling correspond to the calculation rules of the European Commission.

The results of the assessment were critically discussed and compared with the previous data reports from European member states on renewable cooling. In addition, a sensitivity analysis was carried out for selected input parameters of the estimate.

Finally, the following picture emerged with regard to the final results of the estimate of renewable energy used for cooling for the years under review 2021 and 2022. It is clear that the consumption sector of trade, commerce and services accounts for the largest share of renewable cooling.

Abbildung 2: Estimation results for the renewable energy used for cooling supply in the consumption sectors and district cooling supply



Source: [Own illustration based on calculations by IE Leipzig]

1 Einleitung

Der vorliegende Fachbericht wurde im Auftrag des Umweltbundesamtes für die Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) erstellt. Er ist Teil des Projekts: Wissenschaftliche Analysen zu ausgewählten Aspekten der Statistik erneuerbarer Energien und zur Unterstützung der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik.

Gemäß den Anwendungsbilanzen der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen waren im Jahr 2022 etwa 12 % des gesamten Stromverbrauchs in Deutschland auf Anwendungsbereiche der Prozess- und Klimakälte zurückzuführen (AGEB 2023). Insgesamt wird für die Kälteversorgung ein Endenergieverbrauch von rund 60 TWh ausgewiesen. Die Kälteversorgung stellt somit einen relevanten Anwendungsbereich in Deutschland dar.

Angesichts der ambitionierten Ziele der Richtlinie (EU) 2018/2001 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen ist es von besonderer Bedeutung, dass der Anteil erneuerbarer Energien in den Mitgliedstaaten einheitlich ermittelt werden kann (EU 2018). In diesem Kontext gibt es verbindliche Berechnungsmethoden für Verbrauchssektoren, wie z.B. Verkehr und Wärmeversorgung. Für die Berechnung der erneuerbaren Energien in der Kälteversorgung fehlte bisher eine Richtlinie. Diese wurde mit einer Änderung des Anhangs VII der Richtlinie (EU) 2018/2001 im Dezember 2021 nachgeholt.

Zur Vorbereitung der Datenmeldung ist die Berechnungsmethodik hinsichtlich der nationalen Umsetzung zu prüfen. Dabei werden die für die Berechnung der erneuerbaren Kälte relevanten Definitionen deskriptiv geklärt. Darüber hinaus wird der Anwendungsbereich der Richtlinie herausgearbeitet und auf Basis verschiedener Datenerhebungen aus der Vergangenheit relevante Verbrauchssektoren abgegrenzt. Grundlage hierfür bildet eine umfassende Literaturrecherche zu bisher verfügbaren Daten im Bereich der Kälteversorgung auf deutscher und europäischer Ebene. Anschließend wird die methodische Berechnungsvorschrift gemäß der Verordnung der Europäischen Kommission beschrieben und dargestellt.

Unter Berücksichtigung der verfügbaren Datenquellen und der vorgegebenen Methodik soll ein Berechnungsmodell entwickelt werden, das trotz der lückenhaften Datengrundlage eine näherungsweise Quantifizierung der erneuerbaren Kälte in Deutschland ermöglicht. Die Ergebnisstruktur wird dabei mit dem SHARES-Tool (Short Assesment of Renewable Energy Sources) abgeglichen, welche auch die Grundlage für die internationale Berichterstattung im Rahmen der Energie- und Klimaschutzpläne ist. Zur Kompensation der lückenhaften Datenbasis wurden innerhalb des Berechnungsmodells verschiedene Annahmen getroffen, die im Zuge von Interviews mit Fachakteuren validiert werden sollten.

2 Datengrundlage zur Kälteversorgung in Deutschland

Die Kälteversorgung ist in nahezu allen Wirtschaftsbereichen und privaten Haushalten präsent. Angefangen von der Haushaltskälte (z.B. Kühlschränke, Gefriertruhen) über Anwendungen im Gewerbe (z.B. Fleischer- und Bäckerhandwerk) und in Fahrzeugen bis hin zu industriellen Anwendungen (z.B. chemische Industrie, Nahrungsmittelherstellung). Angesichts der klimatischen Veränderungen wird die Relevanz von Kältesystemen weiter ansteigen.

In der Praxis werden vor allem Kompressionskältemaschinen zur Kälteerzeugung eingesetzt. Alternativ können auch Absorptions- und Adsorptionskältemaschinen Anwendung finden. Diese spielen jedoch in Deutschland eine untergeordnete Rolle.

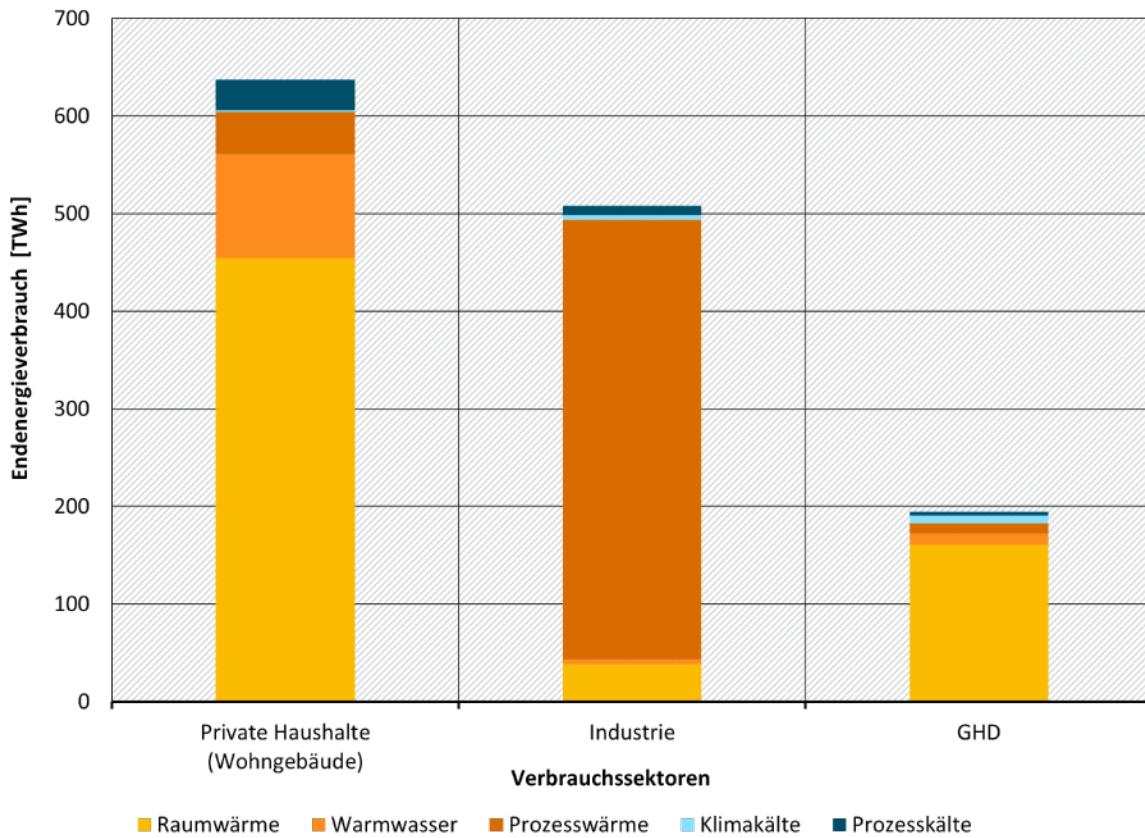
- ▶ Kompressionskältemaschinen sind elektrisch angetriebene Kältemaschinen. In einem linksdrehenden Kreisprozess ändert ein Kältemittel nacheinander seinen Aggregatzustand von flüssig zu gasförmig und umgekehrt (Schmidt et al. 2020). Durch die Verdampfung des Kältemittels wird der Umgebung Verdampfungswärme entzogen und so der Kühleffekt erzeugt (Schmidt et al. 2020). Kompressionskältemaschinen haben den größten Marktanteil unter den Kälteversorgungssystemen (Schmidt et al. 2020).
- ▶ Absorptionskältemaschinen werden durch Wärme angetrieben. Die Verdichtung des Kältemittels erfolgt thermisch durch einen Sorptionsprozess. Die Kühlung erfolgt mittels zwei ineinander geschaltete Kreisläufe (Kältemittel- und Lösungsmittelkreislauf). Die Kombination von Kältemittel und Lösungsmittel als Arbeitsstoffpaar (z.B. NH₃/H₂O-AbkM) ist charakteristisch für die jeweiligen Kühlsysteme (Schmidt et al. 2020).
- ▶ Adsorptionskältemaschinen werden ebenfalls durch Wärme angetrieben. Unter Verwendung eines festen Sorptionsmittels, wie z.B. Aktivkohle, Zeolith oder Silikagel wird ein Kältemittel durch einen Sorptionsprozess verdichtet (Schmidt et al. 2020).

In diesem Kapitel wird zunächst die Datenlage zur Kälteversorgung in Deutschland anhand von ausgewählten Veröffentlichungen beschrieben. In den nachfolgenden Betrachtungen wird zur Quantifizierung der Energiemengen im Bereich der Kälteversorgung zwischen dem Kältebedarf und dem Endenergieverbrauch unterschieden. Der Endenergieverbrauch bezeichnet den elektrischen und nicht-elektrischen Energieverbrauch, der für den Antrieb von Kältesystemen benötigt wird. Der Kältebedarf bezeichnet die Nutzenergie (Kälteenergie), die unmittelbar zum Zweck der Kälteversorgung verwendet wird. Alternativ kann der Kältebedarf als kumulierte abzuführende Wärmemenge definiert werden. Über die Effizienz der Anlagen kann vom Kältebedarf auf den Endenergiebedarf geschlossen werden (Preuß 2019).

Bevor auf die bisherigen Erhebungen zur Kälteversorgung in Deutschland näher eingegangen wird, erfolgt in Abbildung 3 eine vergleichende Darstellung des Endenergieverbrauchs für Wärme- und Kälte in den relevanten Verbrauchssektoren auf Basis der Anwendungsbilanzen der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen für das Betrachtungsjahr 2022 (AGEB 2023). Für das Verständnis der Abbildung ist zudem die Unterscheidung von Klima- und Prozesskälte von Bedeutung. Der Endenergieverbrauch im Bereich der Klimakälte umfasst den Betrieb von Anlagen, die ausschließlich der thermischen Konditionierung von Räumen zum menschlichen Wohlbefinden dienen. Die Prozesskälte hingegen umfasst zum einen die Kühlung innerhalb industrieller Prozesse. Zum anderen werden darunter alle Kühlgeräte in den Sektoren Wohngebäude und Gewerbe, Handel, Dienstleistung verstanden, die beispielsweise zur Kühlung

von Lebensmitteln eingesetzt werden. Dies erklärt, warum der Sektor Private Haushalte den größten Endenergieverbrauch für Prozesskälte aufweist.

Abbildung 3: Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte in den Verbrauchssektoren

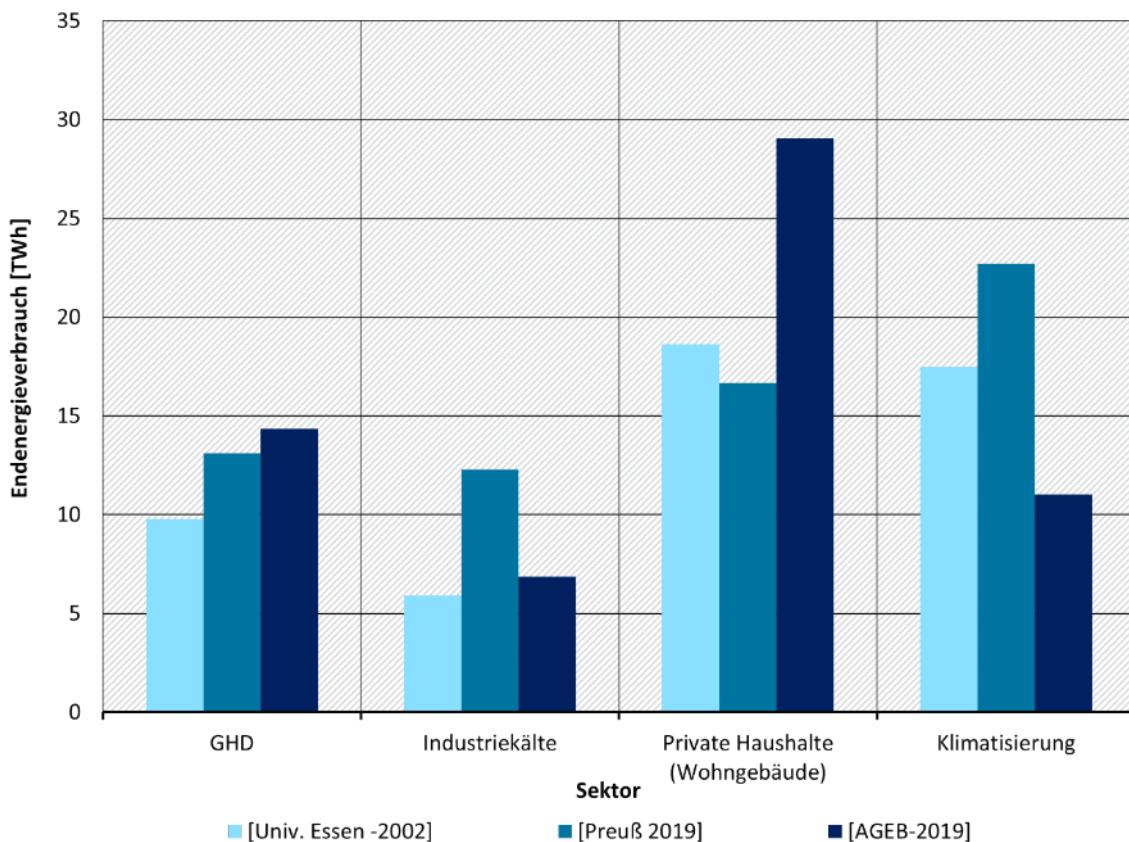


Quelle: [Eigene Darstellung auf Basis von AGEB 2023]

Damit wird deutlich, dass die Klima- und Prozesskälte einen vergleichsweise geringen, aber dennoch relevanten Anteil am Endenergieverbrauch in den Verbrauchssektoren Private Haushalte, Industrie und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen ausmacht. Vor dem Hintergrund der fortschreitenden Erwärmung der Erdatmosphäre wird die Kälteversorgung auch in Deutschland zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Auf Basis einer Metastudie zum Kältebedarf in Deutschland (Goetschkes et al. 2021) des Fraunhofer-Instituts für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT werden weitere Erhebungen im Bereich der Kälteversorgung betrachtet. Dabei wurden erhebliche Abweichungen zwischen den Schätzungen festgestellt. Abbildung 4 gibt anhand der Darstellung der Ergebnisse für den Endenergieverbrauch der Kälteversorgung einen Eindruck über die Heterogenität der Ergebnisse. Der Energieverbrauch der Klimatisierung wird hierbei separat erfasst und ist sektorenübergreifend zu interpretieren. Ein Sonderfall ergibt sich zudem im Hinblick auf die Fahrzeugklimatisierung, deren Endenergieverbrauch je nach Publikation separat erfasst oder der Klimatisierung zugerechnet wird.

Abbildung 4: Vergleich ausgewählter Studienergebnisse für den Endenergieverbrauch der Kälteversorgung in den Verbrauchssektoren und der Klimatisierung



Quelle: [Eigene Darstellung auf Basis von Goetschkes et al. 2021]

Der Kenntnisstand zum Energieverbrauch der Kälteversorgung in Deutschland ist daher nicht gesichert. Die Abweichungen sind auf unterschiedliche Erhebungsmethoden in den jeweiligen Studien zurückzuführen. Darüber hinaus werden die verbrauchsrelevanten Sektoren häufig unterschiedlich untergliedert.

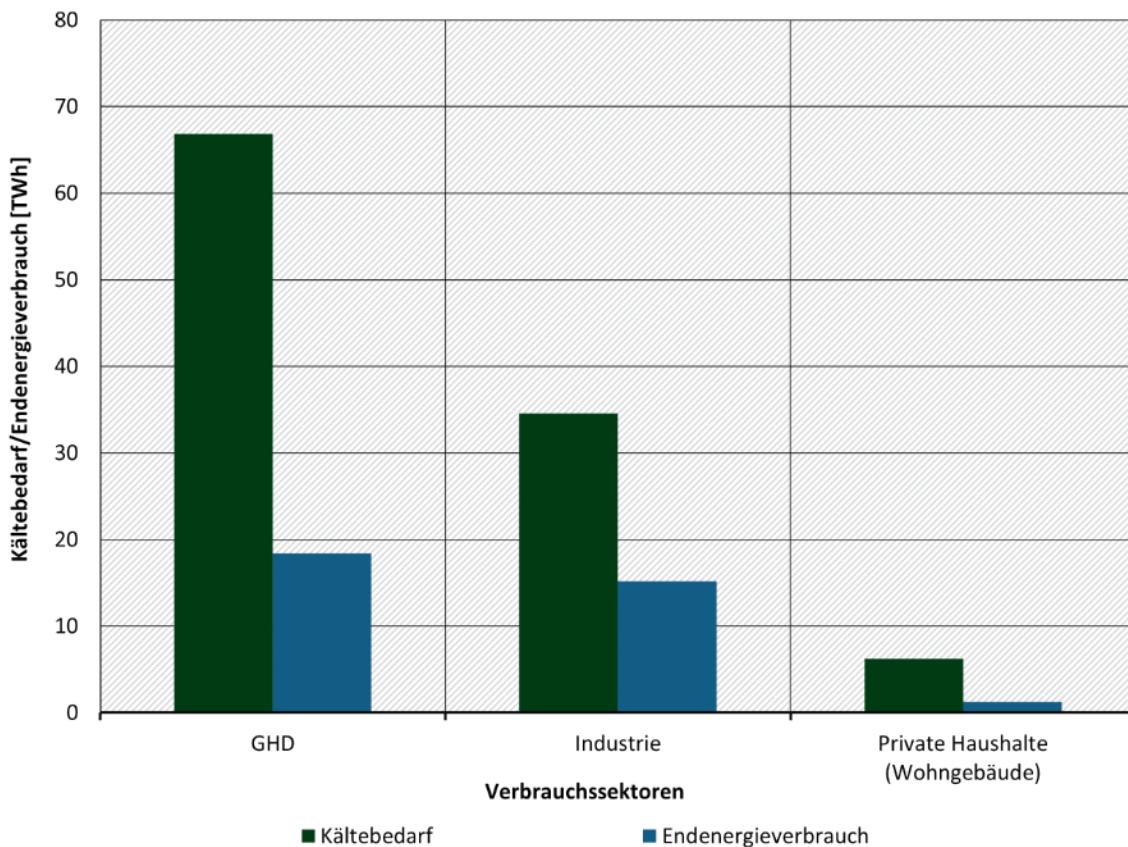
Für die weitere Betrachtung stand zum einen die Studie des VDMA e.V. „Energiebedarf für Kältetechnik in Deutschland. Eine Abschätzung des Energiebedarfs von Kältetechnik in Deutschland nach Einsatzgebieten“ (Preuß 2019) im Zentrum. Dabei werden alle relevanten Verbrauchssektoren der Kälteversorgung betrachtet und die Stückzahlen der jeweils installierten Kälteversorgungssysteme abgeschätzt (vgl. Tabelle 3).

Ebenfalls relevant für die nachfolgende Analyse war die Studie „Nachhaltige Kälteversorgung in Deutschland an den Beispielen Gebäudeklimatisierung und Industrie“ des Instituts für Luft- und Kältetechnik Dresden gGmbH herausgegeben vom Umweltbundesamt (Heinrich et al. 2014). Darin wird neben dem Endenergieverbrauch auch der Kältebedarf für die verbrauchsrelevanten Sektoren angegeben, wobei sich die Angaben hierzu wiederum stark von den in Abbildung 5 dargestellten Verhältnissen unterscheiden. Darüber hinaus wurden die Bedarfstemperaturen für die Sektoren ermittelt (vgl. Tabelle 2).

Gemäß Artikel 14 der EU-Energieeffizienzrichtlinie 2012/27/EU sind die Mitgliedstaaten verpflichtet, der Europäischen Kommission alle fünf Jahre eine Bewertung der Effizienz der Wärme- und Kälteversorgung vorzulegen (EU 2012). Eine entsprechende Bewertung war erstmals bis zum 31. Dezember 2015 zu erstellen. Die Berichtspflicht für das Jahr 2020 wurde

mit der Veröffentlichung „Umfassende Bewertung des Potenzials für eine effiziente Wärme- und Kältenutzung für Deutschland“ (Steinbach et al. 2021) erfüllt. Während die Betrachtung des Endenergieverbrauchs für die Kälteversorgung in Deutschland in dieser Publikation maßgeblich auf den Anwendungsbilanzen der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen basiert, erfolgt die Betrachtung des Kältebedarfs über Referenznutzungsgrade aus dem FORECAST-Modell des Fraunhofer ISI und der Gebäudemodellierung in den Szenarien des Nationalen Energie- und Klimaschutzplans (Kemmler et al. 2020). In Abbildung 5 wird das Verhältnis von Kältebedarf zu Endenergieverbrauch für die relevanten Verbrauchssektoren dargestellt.

Abbildung 5: Kältebedarf und Endenergieverbrauch der Kälteversorgung in den Verbrauchssektoren



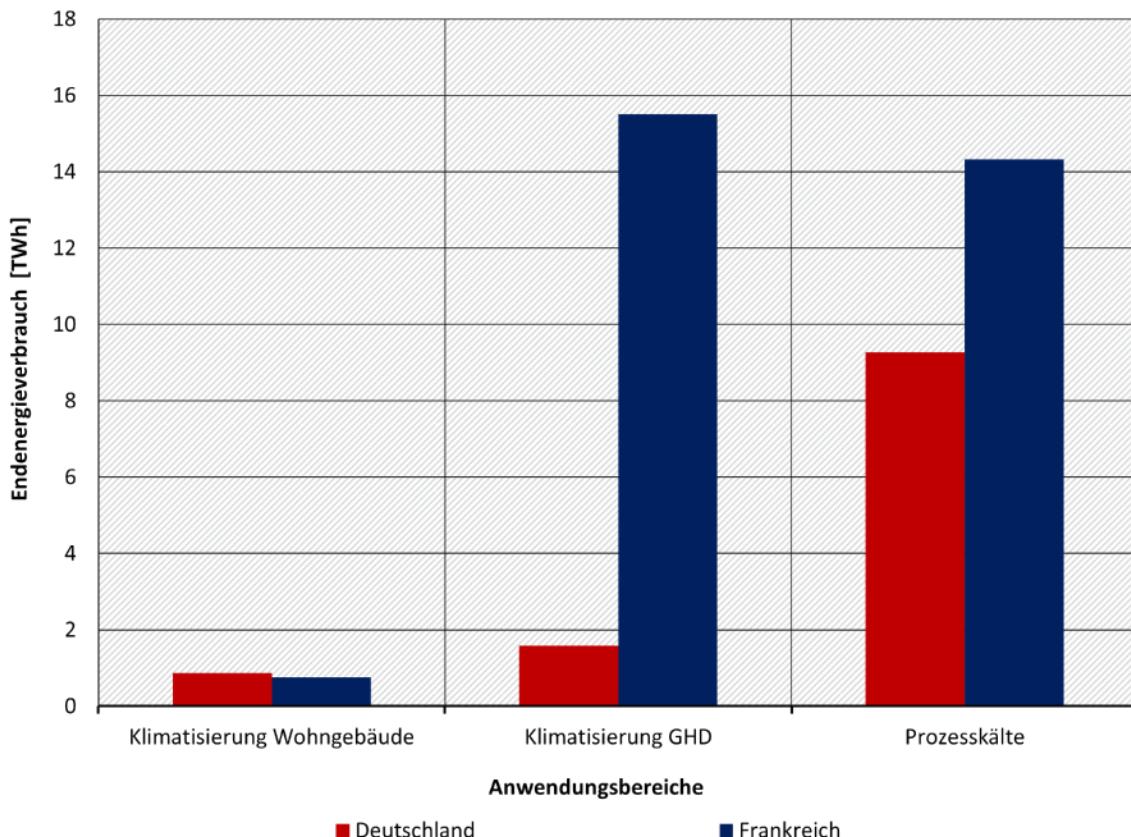
Quelle: [Eigene Darstellung auf Basis von Steinbach et al. 2021]

Im Hinblick auf die in Abbildung 5 dargestellten Effizienzen des Anlagenbestandes ergibt sich je nach Verbrauchssektor ein differenziertes Bild. So ist die Effizienz im Verbrauchssektor Industrie deutlich geringer, da insbesondere bei der Bereitstellung von Prozesskälte sehr niedrige Bezugstemperaturen erreicht werden müssen, was zu einem höheren Endenergieeinsatz führt.

Von besonderer Bedeutung für die Erstellung der vorliegenden Publikation war die Studie „Renewable Cooling under the Revised Renewable Energy Directive ENER/C1/2018-493“ (Pezutto et al. 2021). Diese Studie wurde von der Europäischen Kommission in Vorbereitung der Entwicklung einer Berechnungsvorschrift für den Anteil erneuerbarer Energien in der Kälteversorgung in Auftrag gegeben. Neben den methodischen Überlegungen zur Entwicklung einer entsprechenden Berechnungsvorschrift, enthält diese Publikation eine umfassende Literaturrecherche zur Kälteversorgung in allen Mitgliedsstaaten. Neben einer Quantifizierung des Endenergieverbrauchs für das Betrachtungsjahr 2016 wurden Daten zu Anlagenzahl,

Vollbenutzungsstunden, Anlageneffizienzen und Anlagentypen zusammengetragen. In Abbildung 6 wird beispielhaft der Endenergieverbrauch für die Kälteversorgung in den relevanten Verbrauchssektoren für Deutschland und Frankreich dargestellt. Die Studie enthält darüber hinaus Daten für alle Mitgliedsstaaten und Großbritannien.

Abbildung 6: Endenergieverbrauch der Kälteversorgung differenziert nach Klimatisierung und Prozesskälte für die Länder Frankreich und Deutschland



Quelle: [Eigene Darstellung auf Basis von Pezutto et al. 2021]

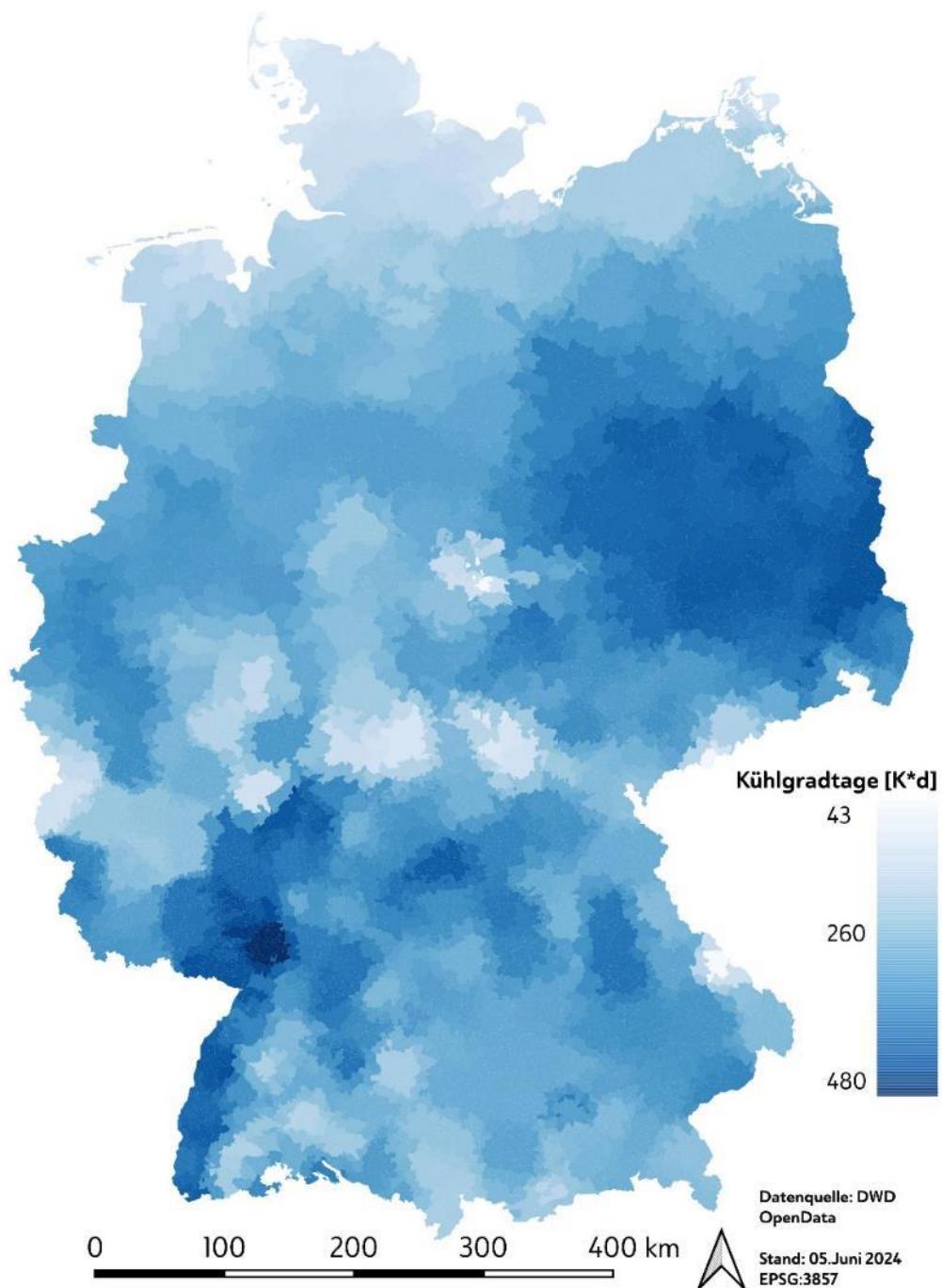
Im Vergleich zu Abbildung 4 ergibt sich im Rahmen dieser Studie ein deutlich geringerer Endenergieverbrauch für die Klimatisierung in Deutschland. Es kann daher nochmals darauf hingewiesen werden, dass der Kenntnisstand über den Endenergieverbrauch der Kälteversorgung in Deutschland nicht gesichert ist und die Vergleichbarkeit der verschiedenen Erhebungen aufgrund unterschiedlicher Untergliederungen der Verbrauchssektoren und anderer Annahmen nur bedingt gegeben ist. Mit Blick auf Abbildung 6 ist zudem der Unterschied zwischen Deutschland und Frankreich bei der Klimatisierung des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen kritisch zu hinterfragen.

Hinsichtlich der Datengrundlage zur Fernkälteversorgung in Deutschland ist insbesondere der jährlich aktualisierte Hauptbericht des AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V. zu benennen. Dem Hauptbericht können verschiedene Informationen zur Fernkälteversorgung in Deutschland, z.B. Anzahl der Kältenetze, angeschlossene Anlagenleistung und nutzbare Kälteabgabe, entnommen werden. Abhängig vom Teilnehmerkreis der AGFW-Umfrage gibt es bei diesen Parametern deutliche Schwankungen zwischen den Jahren, so dass hier auf die Darstellung einer Zeitreihe verzichtet wird. Zur Betrachtung der Fernkälteversorgung im europäischen Vergleich kann die Publikation „Recent

“Advances in District Cooling Diffusion in the EU27+UK: An Assessment of the Market” (Pezutto et al. 2022) herangezogen werden.

Ein weiterer besonders relevanter Parameter für die nachfolgenden Betrachtungen stellen die Kühlgradtage für Deutschland dar. Auf Basis der Messdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) kann eine regionalisierte Betrachtung des Kältebedarfs in Abhängigkeit von der Temperatur erfolgen (vgl. Abbildung 7). Dabei zeigen sich deutliche Unterschiede innerhalb Deutschlands. Diese Betrachtung kann jedoch nur als Anhaltspunkt für den resultierenden Kältebedarf angesehen werden.

Abbildung 7: Regionalisierte Betrachtung der Kühlgradtage in Deutschland



Quelle: [Eigene Darstellung auf Basis von DWD]

3 Richtlinie (EU) 2018/2001 Anhang VII

3.1 Relevanz

Mit der EU-Richtlinie 2018/2001 zur „Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen“ wurden ambitionierte Ziele für die Energiewende gesetzt. Der Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttoendenergieverbrauch der Europäischen Union soll bis 2030 auf 32 % steigen. Darüber hinaus soll der Anteil erneuerbarer Energien im Wärme- und Kältesektor um einen indikativen Wert von 1,3 % jährlich erhöht werden (EU 2018).

Während es bereits etablierte Methoden zur Berechnung der Anteile erneuerbarer Energien an der Stromversorgung, im Verkehr und bei der Wärmeversorgung gibt, fehlte bisher eine Methode zur Ermittlung der erneuerbaren Kälteversorgung (EU COM 2021). Dies führte dazu, dass der Kältesektor keinen Beitrag zum Gesamtziel der Europäischen Union für erneuerbare Energien leisten konnte. Insbesondere für die Mitgliedstaaten mit einem hohen Energieverbrauch in der Kälteversorgung war dadurch die Einhaltung ihrer Zielvorgaben erschwert. Mit der Änderung des Anhangs VII der Richtlinie 2018/2001 wird eine Methode zur Berechnung der Kälteversorgung aus erneuerbaren Quellen, einschließlich der Fernkälte, eingeführt (EU COM 2021). Mit der Methode soll sichergestellt werden, dass alle Mitgliedstaaten den Anteil erneuerbarer Energien an der Kälteversorgung in gleicher Weise ermitteln, um eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Dies ist im Hinblick auf eine gesamteuropäische Überwachung, Berichterstattung und Überprüfung der zur Wärme- und Kälteversorgung genutzten erneuerbaren Energie relevant. Auf diese Weise können die Anstrengungen der Mitgliedstaaten zum Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien unabhängig von den klimatischen Bedingungen der Region fair bewertet werden. Die Bandbreite der Jahresmitteltemperaturen innerhalb der Europäischen Union ist in Tabelle 1 dargestellt. Darüber hinaus ist zu beachten, dass die Berechnungsvorschrift den Mitgliedstaaten lediglich die Möglichkeit einräumt, erneuerbare Energie in der Kälteversorgung zu melden. Eine verpflichtende Meldung ist nicht vorgesehen.

Tabelle 1: Jahresdurchschnittstemperatur ausgewählter Mitgliedstaaten der EU für 2022 (Climate Change Knowledge Portal 2024)

Mitgliedsstaat	Jahresdurchschnittstemperatur [°C]
Malta	20,26
Spanien	15,30
Frankreich	13,16
Deutschland	10,83
Estland	6,90
Finnland	3,24

Grundlage ist eine externe Studie zur fachlichen Unterstützung bei der Entwicklung einer Berechnungsmethodik, als Basis für die Erstellung der Richtlinie. In dieser Studie wurden mögliche Optionen für die Definition und Berücksichtigung erneuerbarer Energien in der Kälteversorgung analysiert (Pezutto et al. 2021). Darüber hinaus wurde ein detaillierter Überblick über die Technologien und den Endenergieverbrauch (vgl. Abbildung 6) sowie eine modellbasierte Folgenabschätzung zu den Auswirkungen auf den Gesamtanteil erneuerbarer Energien und auf die Zielerreichung im Wärme- und Kältesektor erstellt (Pezutto et al. 2021).

Außerdem leistete die gemeinsame Forschungsstelle (JRC) wissenschaftliche Unterstützung (Lyons et al. 2021), um die Abgrenzung zwischen den Bereichen Kälteversorgung sowie Abwärme und -kälte zu präzisieren.

Gemäß Artikel 7 Absatz 3 Unterabsatz 5 der Richtlinie (EU) 2018/2001 wurde die Kommission aufgefordert, bis zum 31. Dezember 2021 einen delegierten Rechtsakt zu erlassen, um eine Berechnungsmethode vorzulegen (EU 2018). Bereits im Vorfeld wurde die Öffentlichkeit um Rückmeldungen zum Richtlinienentwurf gebeten. Aus den Rückmeldungen von drei Unternehmen, sechs Unternehmensverbänden und zwei Behörden ging hervor, dass die Öffentlichkeit die Einführung der Berechnungsmethode begrüßt. Im weiteren Verfahren folgten Ad-hoc-Sachverständigensitzungen zur Klärung technischer Fragen und zur Abschätzung administrativer Auswirkungen.

Zum 14. Dezember 2021 wurde der Anhang VII der Richtlinie (EU) 2018/2001 geändert und die Methode zur Berechnung der erneuerbaren Energie in der Kälteversorgung ist in Kraft getreten (EU COM 2021).

3.2 Begriffsbestimmungen

Zum besseren Verständnis werden in diesem Abschnitt die wichtigsten Begriffe der Richtlinie definiert.

Erneuerbare Kälte:

Erneuerbare Energie ist definiert als Energie aus nicht-fossilen Quellen. Erneuerbare Energieträger sind beispielsweise Wind, Sonne oder Umgebungsenergie (EU 2018). Die Fähigkeit der Umwelt, Wärme aufzunehmen, kann als erneuerbares Energieelement bzw. erneuerbare Kältequelle betrachtet werden. Dementsprechend wird die Nutzung einer solchen Kältequelle als erneuerbare Kühlung klassifiziert.

Durch die Nutzung einer erneuerbaren Kältequelle erhöht sich die Effizienz des Kälteversorgungssystems. Die Energieeffizienz der Anwendungen ist der ausschlaggebende Faktor bei der Entscheidung, welcher Anteil der Umweltwärme als erneuerbar angerechnet werden kann.

Der Betrieb von Kälteerzeugern mit erneuerbar erzeugtem Strom ist hingegen nicht zwangsläufig als erneuerbare Kühlung anzusehen. Da der Strom bereits im Rahmen der Richtlinie (EU) 2018/2001 auf den Anteil von Strom aus erneuerbaren Quellen angerechnet wird und eine Doppelzählung vermieden werden soll.

Instationäre Kälteversorgungssysteme sind von dieser Definition ausgenommen.

Wärmesenke/Kältequelle:

Bezeichnet einen externen, natürlich vorkommenden Bereich, in den die durch Kühlung entzogene Wärme abgeführt werden kann. Dabei kann es sich um Umgebungsluft, Umgebungswasser oder geothermische Formationen handeln.

Aktive Kühlung:

Bei der aktiven Kühlung wird dem Kälteversorgungssystem Energie zugeführt, um den Entzug von Wärme aus einem Raum oder Prozess zu ermöglichen. Aktive Kühlung kann mit oder ohne Kälteerzeuger (freie Kühlung) erfolgen und wird eingesetzt, wenn der natürliche Energiefluss nicht ausreicht oder nicht verfügbar ist.

Freie Kühlung:

Bei der freien Kühlung nutzt das Kälteversorgungssystem eine natürliche Kältequelle, um einem

Raum oder Prozess durch den Transport von Fluiden Wärme zu entziehen (EU COM 2021). Energie wird lediglich für den Betrieb von Pumpen oder Ventilatoren benötigt.

Passive Kühlung:

Die passive Kühlung erfordert keine Bewegung eines Kühlmediums. Der Kühleffekt wird durch den natürlichen Energiefluss erzeugt. Als passive Kühlung gilt beispielsweise Gebäudedämmung, Beschattung oder Wärmeentzug durch Leitung.

Fernkälteversorgung:

Die Fernkälteversorgung verhält sich analog zur Fernwärmeverversorgung und bezeichnet die Kälteversorgung über ein Leitungsnetz. Die Kälte wird zentral oder dezentral erzeugt und unter Einsatz von kalten Flüssigkeiten zu den Abnehmer*innen transportiert.

Jahreszeitbedingter Primärleistungsfaktor (SPFp – seasonal performance factor):

Eine Messgröße für die Effizienz eines Kälteversorgungssystems, die ohne Berücksichtigung der Verteilungsverluste ermittelt wird. Gemäß der delegierten Verordnung muss die Berechnungsmethode jahreszeitbedingte Leistungsfaktoren enthalten, da die Energieeffizienz der grundlegende Faktor für die Bewertung der Verfügbarkeit erneuerbarer Energie ist.

Äquivalente Vollaststunden:

Die Anzahl der Stunden, in denen ein Kälteversorger bei Vollast betrieben werden müsste, um die Kältemenge zu erzeugen, die er im Laufe des Jahres, bei unterschiedlicher Last, tatsächlich erzeugen würde (EU COM 2021).

Kühlgradtage:

Beschreiben die Jahressumme der Temperaturdifferenzen zwischen dem Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur und der Bezugstemperatur (18 °C).

3.3 Anwendungsbereich

Im Zusammenhang mit der Berechnungsmethodik für erneuerbare Kälte ist Kühlung definiert als der Entzug von Wärme aus einem geschlossenen Raum (zur Gewährleistung des menschlichen Komforts) oder aus einem Prozess, um die Raum- oder Prozesstemperatur auf eine bestimmte Solltemperatur zu senken oder zu halten. Zur Unterscheidung der beiden Anwendungsbereiche werden die Begriffe Klima- und Prozesskälte verwendet. Grundsätzlich kann einem Raum oder Prozess Wärme entzogen werden, wenn die Vorlauftemperatur des Kühlsystems niedriger ist als die Temperatur des zu kühlenden Raumes oder Prozesses.

Raumkühlung ist definiert als der Entzug von Wärme aus der Luft, um die Raumluft auf eine bestimmte Temperatur abzukühlen und den Menschen gesunde Bedingungen und thermischen Komfort zu bieten. Raumkühlungsanwendungen sind hauptsächlich im tertiären Sektor (z.B. Büros, Bildungswesen, Hotels) und im Wohnbereich (Ein-, Mehrfamilienhäuser und Wohnblocks) zu finden. Es gibt aber auch Raumkühlungsanwendungen im industriellen Sektor (z.B. Komfortkühlung in Fabriken).

Unter Prozesskühlung versteht man die Abfuhr von Wärme aus Prozessen (z.B. Kühlung von Kunststoffformen), aus Produkten oder aus einem geschlossenen Raum, in dem sich diese Prozesse oder Produkte befinden, mit dem Ziel, die erforderliche Solltemperatur zu halten.

Für die Berechnung der erneuerbaren Kälte sind in Anhang VII eine Reihe von Anwendungsbereichen aufgeführt, die explizit nicht zu berücksichtigen sind.

Passive Kühlung, ist als Kälteversorgung durch den natürlichen Fluss thermischer Energie ohne Nutzung einer Kühlvorrichtung zu verstehen und wird daher aus der Berechnung ausgeschlossen (EU COM 2021). Wird jedoch die Belüftungsluft als Wärmetransportmedium für

die Kälteversorgung genutzt, wird die entsprechende Kühlung in der Berechnung berücksichtigt (EU COM 2021).

Folgende Bereiche der Kälteversorgung sind zusätzlich abzugrenzen (EU COM 2021):

- ▶ Kälteversorgung in Verkehrsmitteln
- ▶ Kälteversorgung zur Lagerung verderblicher Materialien
- ▶ Kälteversorgung im Bereich der Raum- oder Prozesskühlung mit Solltemperaturwerten von unter 2 °C
- ▶ Kälteversorgung im Bereich der Raum- oder Prozesskühlung mit Solltemperaturwerten von über 30 °C
- ▶ Kühlung von Abwärme bei der Energieerzeugung, in Industrieverfahren und im tertiären Sektor

Die Gründe für die Abgrenzung dieser Bereiche werden im Folgenden erläutert.

Die Energieversorgung von **Kälteerzeugern in Verkehrsmitteln** (z.B. PKW, LKW oder Schiff) erfolgt in der Regel über den Motor und unterliegt daher bereits Vorschriften im Bereich Verkehr und Kraftstoffeffizienz (Pezutto et al. 2021). Darüber hinaus legt die Richtlinie explizit fest, dass die Definition von erneuerbarer Kälte nur für die stationäre Kälteversorgung gilt.

Bei der Abgrenzung der **Lagerung verderblicher Materialien** ist zu beurteilen, welche Materialien als verderblich angesehen werden können. Im Zentrum steht dabei die Lagerung von Lebensmitteln. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass alle Materialien, die ein Verfallsdatum haben als verderblich angesehen werden können und somit auch die Kühlung von Medikamenten oder Chemikalien betroffen ist. Die Abgrenzung zur Lagerung von verderblichen Materialien erfolgt über die üblicherweise eingesetzten Kühlsysteme. Häufig werden in diesem Bereich Kompressionskältemaschinen verwendet, deren Kältemittel Verdampfungstemperaturen von unter -10 °C aufweisen. Bei derart niedrigen Verdampfungstemperaturen ist die Nutzung natürlicher Kältequellen weitgehend ausgeschlossen und die Anlageneffizienz vergleichsweise gering. Der Einsatz erneuerbarer Energien zur Kühlung verderblicher Materialien ist demzufolge nur durch den Betrieb der Kältemaschine mit erneuerbar produziertem Strom gewährleistet. In diesem Fall würde die Energie jedoch bereits auf Basis der Erneuerbaren-Energien-Richtlinie 2018/2001 unter dem Anteil erneuerbar erzeugter Strom/Wärme ausgewiesen werden. Eine Doppelzählung der aufgewandten Energie ist bisher (RED II) nicht zulässig. Zudem wird das Potenzial für Effizienzsteigerungen bereits durch die EU-Vorgaben zum Ökodesign und zur Energieverbrauchskennzeichnung abgedeckt (Pezutto et al. 2021).

Die untere Grenze des **Temperaturbereichs 2 – 30 °C** resultiert aus der minimalen Temperatur, bei der das Umgebungswasser noch flüssig ist. Die obere Grenze folgt aus den maximalen Umgebungsbedingungen in Europa. Nach Richtlinie (EU) 2281/2016 ist die Kühlung von Wasser innerhalb eines Kühlturms von 35 °C auf 30 °C gegeben für eine Temperatur von bis zu 35 °C Trockenkugeltemperatur und 24 °C Feuchtkugeltemperatur (EU 2016). Diese Temperaturen entsprechen in etwa den maximalen monatlichen Durchschnittstemperaturen in Europa. Dementsprechend wird der Bereich, in dem Kältemaschinen durch die Nutzung natürlicher Kältequellen ersetzt werden können, bis maximal 30 °C gesehen (Pezutto et al. 2021).

Die **Abgrenzung der Abwärmenutzung** spielt insbesondere im Bereich der Prozesskühlung eine wesentliche Rolle ein. Alle thermischen Kraftwerke, Verbrennungsprozesse und andere Hochtemperaturprozesse bieten prinzipiell die Möglichkeit der Abwärmenutzung. Die Freisetzung von Hochtemperaturabwärme in die Umwelt durch erneuerbare Kühlung ohne Wärmerückgewinnung würde dem Prinzip „Efficiency First“ entgegenstehen und ist daher nicht als erneuerbare Kälte anrechenbar (Pezutto et al. 2021). In diesem Zusammenhang sollte klar definiert werden, bei welchen Prozessen die Rückgewinnung bzw. Vermeidung von Abwärme Vorrang vor der Schaffung von Anreizen für die Nutzung der Kälteversorgung aus erneuerbaren Quellen erhalten sollte (EU COM 2021). Beispiele für entsprechende Anwendungsbereiche sind die Kraft-Wärme-Kopplung oder exotherme chemische Reaktionen. In Abschnitt 3.4 sind verschiedene Anwendungsbereiche zusammengestellt.

Um natürliche Kältequellen in bestimmten Gebieten zu schonen (z.B. den Schutz von Flüssen vor Überhitzung), können die Mitgliedstaaten weitere Kategorien von Kälteversorgungssystemen von der Berechnung der für die Kälteversorgung genutzten erneuerbaren Energien ausschließen (EU COM 2021). Eine Positionierung Deutschlands hierzu ist nicht bekannt.

3.4 Identifikation relevanter Kühlanwendungen

Basierend auf der Anforderung in Abschnitt 3.3 können die für die Berechnung der erneuerbaren Kälteenergie relevanten Kälteversorgungsbereiche identifiziert werden.

Eine erste Abgrenzung der relevanten Kühlanwendungen (vgl. Tabelle 2) erfolgte auf Basis der Studie „Nachhaltige Kälteversorgung in Deutschland an den Beispielen Gebäudeklimatisierung und Industrie“ (Heinrich et al. 2014), die im Auftrag des Umweltbundesamtes erstellt wurde. Die Ermittlung der Daten basiert auf Berechnungen, Recherchen und Detailinformationen von Unternehmen und Anwendern. Darüber hinaus waren Abschätzungen und Plausibilitätsannahmen erforderlich. Hervorzuheben ist hierbei die Angabe von Bedarfstemperaturen für die verschiedenen Verbrauchssektoren, die zur Abgrenzung der relevanten Kühlanwendungen herangezogen werden können.

Tabelle 2: Betrachtung der Anwendungsbereiche hinsichtlich ihrer Relevanz für die erneuerbare Kälte unter Einbezug der Bedarfstemperaturen (Heinrich et al. 2014)

Kälte-/Kühlanwendung	Branche/Anwendung	Kältebedarf [GWh/a]	Bedarfstemperatur [°C]	entfällt gänzlich nach Anhang VII
Prozesskühlung	Bergbau, Gewinnung von Steinen und Erden	560	3	Nein
	Papier- und Zellstoffindustrie	252	6	Nein
	Druckindustrie	679	20	Nein
	Chemische Industrie	6.065	-4	Ja
	Luft- und Gasverflüssigung	1.120	-190	Ja
	Pharmazeutische Industrie	933	6	Nein
	Kunststoff- und Gummiverarbeitung	2.820	6	Nein
	Bau- und Baustoffindustrie	1	-25	Ja
	Elektro- und Elektronikindustrie	740	5	Nein
	Fahrzeugindustrie	1550	6	Nein
	Maschinenbau	1000	6	Nein
	Kompressoren	376	3	Nein
Nahrungsmittelherstellung	Prozesskälte	1.824	6	Nein
	Schaltschrankkühlung	376	20	Ja
	Nahrungsmittelindustrie	5.314	-25 bis 0	Ja
	Brauereien	719	-7	Ja
Raumkühlung	Milchviehbetriebe	1.049	4	Nein
	GHD	9.052	6	Nein
	Industrie	17.672	6	Nein
	Rechenzentren und Server	3.335	6	Ja
	Haushalte	728	6	Nein

Abseits von den Kälteanwendungen mit Bedarfstemperaturen außerhalb von 2 bis 30 °C wurden zudem Rechenzentren und Server sowie die Schaltschrankkühlung abgegrenzt, da diese nach Anhang VII der Abwärmenutzung vorbehalten sind.

Eine weitere Grundlage für die Identifikation der relevanten Verbrauchssektoren bildete die Studie „Energiebedarf für Kältetechnik in Deutschland“ des VDMA e.V. (Preuß 2019). In Tabelle 3 werden die Verbrauchssektoren der Kälteversorgung und der jeweils daraus resultierende Endenergiebedarf sowie die installierten Stückzahlen dargestellt. Doppelzählungen von Anwendungen sind aufgrund der Unterteilung der Anwendungsbereiche möglich. Die

Ergebnisse stellen lediglich eine Diskussionsgrundlage dar und sollten perspektivisch präzisiert werden.

Tabelle 3: Betrachtung der Anwendungsbereiche hinsichtlich ihrer Relevanz für die erneuerbare Kälte (Preuß 2019)

Anwendungsbereiche	Anzahl der Kältesysteme [Tsd. Stück]	Gesamtendenergiebedarf [GWh/a]	entfällt gänzlich nach Anhang VII
Haushaltskälte	82.187	17.743	Ja
Supermarktkälte	579	8.502	Ja
Nahrungsmittelherstellung	95	7.232	Nein
Gewerbekälte	2.001	5.154	Ja
Transportkälte	163	1.650	Ja
Klimakälte für Gebäude und Fahrzeuge	52.229	22.696	Nein
Industriekälte	627	12.276	Nein
Medizin	437	1.412	Ja
Kühlhäuser	1	1.475	Ja
Wärmepumpen	5.827	7.693	Ja
Sonstige (u.a. Sport, Wehrtechnik)	60	972	Nein
Gesamt	144.208	86.805	

Die Bereiche Haushaltskälte, Supermarktkälte und Gewerbekälte entfallen, da hier nur Kühl- und Gefriergeräte erfasst wurden (vgl. 3.3 „Lagerung verderblicher Materialien“). Transportkälte ist nicht enthalten, da instationäre Kälteerzeuger nicht unter die Definition von erneuerbarer Kälte fallen. Auch im medizinischen Bereich handelt es sich ebenfalls überwiegend um Kühl- und Gefriergeräte (z.B. Lebensmittelversorgung in Pflegeheimen). Der Rest entfällt auf sehr spezielle Anwendungen, wie z. B. die Zentrifugenkühlung. Kühlhäuser dienen in erster Linie der Lagerung verderblicher Lebensmittel und fallen daher nicht unter Anhang VII.

Die Studie des VDMA e.V. enthält darüber hinaus eine weitere Unterteilung der in Tabelle 3 aufgeführten Anwendungsbereiche unter Angabe verschiedener Daten, wie z.B. Stückzahlen, Energiebedarf oder Energieeffizienz. Der Sektor der Nahrungsmittelherstellung wird analog zu Tabelle 2 untergliedert und lediglich die Milchviehbetriebe fallen in den Geltungsbereich der Richtlinie. Bezuglich des Anwendungsbereiches Klimakälte für Gebäude und Fahrzeuge wird bei näherer Betrachtung zunächst die instationäre Kälteerzeugung abgegrenzt. Die verbleibende Klimakälte für Gebäude wird analog zur Raumkühlung für Wohnbereich und tertiären Sektor aus Tabelle 2 unterteilt. Hierbei sei darauf hingewiesen, dass die Angaben zum Endenergiebedarf in der Raumkühlung wiederum auf die Erhebungen der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen zurückgehen. Die Abgrenzung der Bereiche Industrie- bzw. Prozesskälte ist aufgrund der Konkurrenz zur Abwärmennutzung nicht abschließend geklärt. Ebenfalls in der Studie aufgeführt ist der Sektor Wärmepumpen. Dieser Sektor unterteilt sich in die Anwendungen der Wärmepumpen für private Haushalte und Spezialfälle wie Wärmepumpen-Wäschetrockner und industrielle Großwärmepumpen und ist Bestandteil der Studie, da

Wärmepumpen im Umkehrbetrieb zur Kältebereitstellung eingesetzt werden können. Eine Differenzierung, welcher Anteil des Endenergiebedarfs auf den Umkehrbetrieb zurückzuführen ist, ist jedoch nicht möglich, weshalb dieser Anwendungsbereich zunächst nicht betrachtet wird. Eine Methode zur Berechnung der mit Wärmepumpen genutzten erneuerbaren Energien in der Wärmeversorgung ist bereits Bestandteil von Anhang VII (EU COM 2021). Der Verbrauchssektor „Sonstige“ beinhaltet spezielle Anwendungsfälle, wie z.B. Schneekanonen und können bei der weiteren Betrachtung aufgrund des geringen Endenergiebedarfs vernachlässigt werden.

Auf Basis einer Studie der gemeinsamen Forschungsstelle der Europäischen Kommission konnten in Tabelle 4 weitere Bereiche der Prozesskühlung bzw. Industriekälte abgegrenzt werden, die für die Nutzung von Abwärme prädestiniert sind (Lyons et al. 2021). Diese Erkenntnisse können auf die Verbrauchssektoren auf Tabelle 2 und 3 angewandt werden, um den Geltungsbereich der Richtlinie weiter einzuschränken, erheben jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

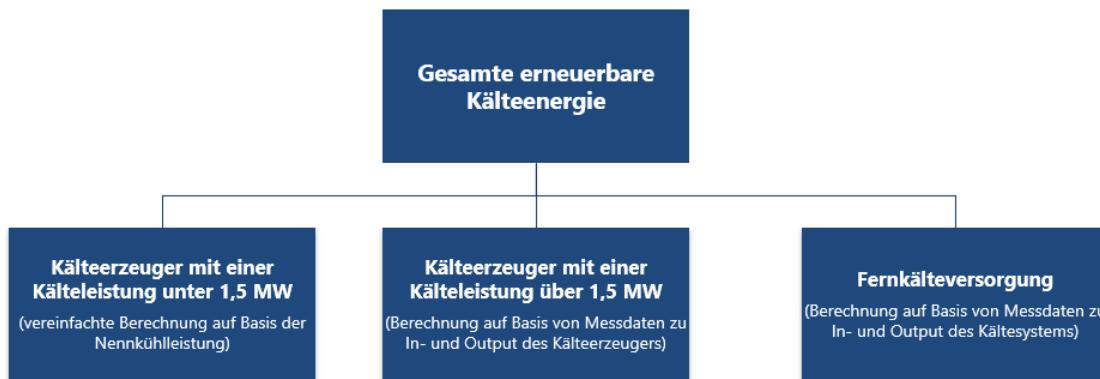
Tabelle 4: Branchen der Prozesskühlung, die der Abwärmenutzung vorbehalten sind (Lyons et al. 2021)

Branche	Einsatzbereich	Temperaturniveau
Nahrungsmittel, Getränke und Tabak	Kühlung von Produkten, Prozessströmen und Trägermedien	0 – 250 °C
Lebensmittel, Getränke und Tabak	Kondensation	0 – 200 °C
Eisen und Stahl	Kontrollierte Kühlung	100 – 800 °C
Textilien und Leder	Kühlung nach dem Waschen	30 – 70 °C
Papier, Zellstoff und Druck	Trocknung (Feuchteregelung)	-40 – 25 °C
Chemie und Petrochemie	Kühlung von Produkten, Prozessströmen und Trägermedien	-40 – 1000 °C
Kunststoffumformung	Hydraulische Kühlung, Temperierung von Formen	-5 – 90 °C

3.5 Methodisches Vorgehen zur Quantifizierung der erneuerbaren Kälte

In der Richtlinie werden drei verschiedene Berechnungsansätze für die Betrachtung der Kälteversorgung unterschieden. Es wird unterschieden zwischen Kälteerzeugern mit einer Nennkühlleistung unterhalb von 1,5 MW, Kälteerzeugern mit einer Nennkühlleistung über 1,5 MW und der Fernkälteversorgung (vgl. Abbildung 8). In den nachfolgenden Abschnitten wird die Vorgehensweise gemäß der Berechnungsvorschrift erläutert.

Abbildung 8: Gliederung zur Berechnung der erneuerbaren Kälte



Quelle: [Eigene Darstellung auf Basis von EU COM 2021]

Abweichend von der nachfolgend dargestellten Berechnungsvorschrift ist es den Mitgliedstaaten gestattet, eigene Berechnungen und Erhebungen durchzuführen, um die Genauigkeit des Endergebnisses gegenüber der Berechnung gemäß Berechnungsvorschrift der Europäischen Kommission zu erhöhen. Insbesondere im Hinblick auf die Vollaststunden (EFLH) und der Anlageneffizienz (SPF_p) tragen regionalisierte Betrachtungen, die auf ausreichend großen repräsentativen Stichproben beruhen, dazu bei, die Genauigkeit des Berechnungsergebnisses zu verbessern. Wählt ein Mitgliedsstaat eine alternative Methode zur Berechnung der zur Kälteversorgung genutzten erneuerbaren Energie, so ist der Kommission ein Bericht über die angewendete Methodik sowie die verwendeten Daten vorzulegen.

3.5.1 Kälteerzeuger unter 1,5 MW

Für Anlagen mit einer Nennkühlleistung von weniger als 1,5 MW besteht die Möglichkeit einen vereinfachten Berechnungsansatz auf Grundlage von Standardwerten durchzuführen (EU COM 2021). Diese Standardwerte ergeben sich aus den Verordnungen der Europäischen Union über die Mindestenergieeffizienz von Klima- und Kühlgeräten (sog. Ökodesign-Verordnungen).

Für diesen Teil der Berechnung wird die Kälteversorgung in drei Bereiche unterteilt. Es wird zwischen der Raumkühlung im Wohnbereich, der Raumkühlung im tertiären Sektor und der Prozesskühlung unterschieden.

Erhebung von Daten für die Nennkühlleistung (P_c)

Nachdem im Kapitel 3.4 bereits der grundlegende Schritt zur Identifikation relevanter Bereiche der Kälteversorgung erfolgt ist, müssen weitere Informationen zu den angewandten Kühlsystemen in diesen Bereichen ermittelt werden. Anhand der Nennkühlleistung wird entschieden, ob ein vereinfachter Berechnungsansatz möglich ist. Dementsprechend ist der Anlagenbestand im jeweiligen Bereich in Anlagen mit einer Nennkühlleistung von über und unter 1,5 MW zu unterteilen.

Die erforderlichen Datenerhebungen sind mit erheblichem Aufwand verbunden. Gegenwärtig wird die Nennkühlleistung entsprechender Anwendungen statistisch nicht erfasst.

Bestimmung des jahreszeitbedingten Primärleistungsfaktor (SPF_p – seasonal performance factor)

Für die Bestimmung des jahreszeitbedingten Primärleistungsfaktor erfolgt die Umrechnung von Mindestenergieeffizienzangaben aus den Ökodesign-Verordnungen. Die Effizienz von Raumklimageräten bis 12 kW wird durch Verordnung (EU) 206/2012 geregelt. In der Verordnung (EU) 2016/2281 werden die Mindesteffizienzen für sonstige Kühlungsprodukte, einschließlich der Prozesskühler, festgelegt. Die Einführung entsprechender Mindesteffizienzen geht auf die Umsetzung der Richtlinie 2009/125/EG („Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte“) zurück.

Die **Verordnung (EU) 206/2012** legt Mindestwerte für die Effizienz von Raumklimageräten fest, die ab dem 1. Januar 2013 in Verkehr gebracht wurden. Bereits zum 1. Januar 2014 wurden die Mindestanforderungen nochmals verschärft, so dass in der folgenden Betrachtung nur noch auf diese Werte Bezug genommen wird (vgl. Tabelle 5).

Tabelle 5: Anforderungen an die Mindestenergieeffizienz von Raumklimageräten (≤ 12 kW)

	GWP > 150	GWP > 150	GWP ≤ 150	GWP ≤ 150
Leistungsklassen	< 6 kW	6-12 kW	< 6 kW	6-12 kW
Raumklimageräte (SEER)	4,60	4,30	4,14	3,87
Einkanal- und Zweikanal Raumklimageräte (EER _{rated})	2,60	2,60	2,34	2,34

Quelle: EU 2012

Es wird deutlich, dass die Anforderungen an die Produkte vom Global Warming Potenzial (GWP) des Kältemittels und von der Leistung des Raumklimagerätes abhängen. Für beide Parameter müssen Daten vorliegen, um eine Mindestenergieeffizienz der Geräte gemäß der Richtlinie festlegen zu können.

Für Raumklimageräte liegt die Arbeitszahl im Kühlbetrieb (SEER) als Kennwert für die Effizienz vor. Bei Einkanal- und Zweikanal Raumklimageräten wird jedoch die Nenn-Leistungszahl im Kühlbetrieb (EER_{rated}) angegeben.

„Arbeitszahl im Kühlbetrieb“ (SEER) bezeichnet den für die gesamte Kühlperiode repräsentativen Gesamtenergiewirkungsgrad des Geräts und ergibt sich aus dem Bezugs-Jahreskühlenergiebedarf geteilt durch den Jahresstromverbrauch. (EU COM 2012)

„Nenn-Leistungszahl im Kühlbetrieb“ (EER_{rated}) bezeichnet das angegebene Leistungsvermögen im Kühlbetrieb (kW) geteilt durch die Nenn-Leistungsaufnahme im Kühlbetrieb (kW) eines Geräts im Kühlbetrieb unter Norm-Nennbedingungen. (EU COM 2012)

Aus den Angaben zur Mindesteffizienz wird dann der jahreszeitbedingte Primärleistungsfaktor SPF_p berechnet. Die Umrechnung der Kennwerte erfolgt auf Basis folgender Formel:

$$SPF_p = \frac{SEER}{\frac{1}{\eta}} - F(1) - F(2)$$

η ist das durchschnittliche Verhältnis zwischen der gesamten Bruttostromerzeugung und dem mit der Stromerzeugung verbundenen Primärenergieverbrauch in der EU ($\eta = 0,475$ und $1/\eta = 2,1$) (EU COM 2021).

F(1) und F(2) sind Korrekturfaktoren. Für Kälteversorgungssysteme, bei denen ein Standard- SPF_p genutzt werden kann, werden die Koeffizienten F(1) und F(2) nicht als Korrekturfaktoren angewandt (EU COM 2021).

F(1) = 0,03 – Berücksichtigung des elektrischen Leistungs- beziehungsweise Arbeitsbedarf der Geräteregelung, relevant für sämtliche Anwendungen in der Raumklimatisierung

F(2) = 0,05 – Berücksichtigung des Energieverbrauchs der Pumpen bei wassergekühlten Systemen

Tabelle 6: Jahreszeitbedingter Primärleistungsfaktor von Raumklimageräten ($\leq 12 \text{ kW}$)

	GWP > 150	GWP > 150	GWP ≤ 150	GWP ≤ 150
Leistungsklassen	< 6 kW	6-12 kW	< 6 kW	6-12 kW
Raumklimageräte (SPF_p)	2,19	2,05	1,97	1,84

*keine Berücksichtigung von Einkanal- und Zweikanal Raumklimageräte

Die Berechnung eines jahreszeitbedingten Primärleistungsfaktors aus der Effizienzangabe für Einkanal- und Zweikanalraumklimageräte (EER_{rated}) ist nach derzeitigem Kenntnisstand nicht möglich. Die Nenn-Leistungszahl im Kühlbetrieb (EER_{rated}) wird unter Vollast bei Norm-Nennbedingungen ermittelt, während es sich bei der Arbeitszahl im Kühlbetrieb (SEER) um einen saisonalen Mittelwert handelt. Die Umrechnung wäre möglich, wenn Nenn-Leistungszahlen für verschiedene Temperaturbereiche zur Verfügung stehen (Paschotta 2016). Diese sind jedoch nicht im Umfang der Mindesteffizienzanforderungen aus Verordnung (EU) 206/2012 enthalten. Daraus folgt, dass die Einkanal- und Zweikanalraumklimageräte bei der Berechnung der erneuerbaren Kälte nicht berücksichtigt werden können bzw. davon ausgegangen werden muss, dass die Mindestenergieeffizienz der anderen Raumklimageräte auch für diese Systeme gilt.

In der **Verordnung (EU) 2016/2281** sind die Mindestenergieeffizienzen für Raumklimageräte mit einer Leistung von mehr als 12 kW und allen übrigen Kühlungsprodukte, die unter die Definition von erneuerbarer Kälte fallen, festgelegt. Die aktuellsten Grenzwerte aus der Verordnung traten zum 1. Januar 2021 in Kraft. In Tabelle 7 werden die Anforderungen an Prozesskühler mit hoher Betriebstemperatur ($> 2^\circ\text{C}$) aufgeführt.

Tabelle 7: Anforderungen an die Mindestenergieeffizienz von Prozesskühlern mit hoher Betriebstemperatur (SEPR)

Übertragungsmedium (kondensationsseitig)	Luft	Luft	Wasser	Wasser	Wasser
Nennkälteleistung [kW]	< 400	≥ 400	< 400	400 – 1500	> 1500
Jahresarbeitszahl (SEPR)	5,0	5,5	7,0	8,0	8,5

Quelle: EU COM 2016

„Jahresarbeitszahl“ (SEPR) bezeichnet den Wirkungsgrad eines Prozesskühlers mit hoher Betriebstemperatur bei Norm-Prüfbedingungen, die für die Schwankungen der Last und der

Umgebungstemperatur im Jahresverlauf repräsentativ sind, berechnet als Verhältnis des Jahreskältebedarfs zum Jahresstromverbrauch (EU COM 2016).

Die Umrechnung der Jahresarbeitszahl in einen jahreszeitbedingten Primärleistungsfaktor ermöglicht folgende Formel. Die Vorgehensweise ist vergleichbar mit der Umrechnung der Arbeitszahl im Kühlbetrieb (SEER):

$$SPF_p = \frac{SEPR}{\frac{1}{\eta}} - F(1) - F(2)$$

In Tabelle 8 sind die resultierenden Mindestenergieeffizienzen im Bereich der Prozesskühlung aufgeführt. Die Angabe für Prozesskühler mit dem Übertragungsmedium Wasser (kondensationsseitig) und einer Nennkühlleistung von mehr als 1.500 kW entfällt, da für diesen Leistungsbereich kein vereinfachter Berechnungsansatz zulässig ist.

Tabelle 8: Jahreszeitbedingte Primärleistungsfaktoren von Prozesskühlern mit hoher Betriebstemperatur (SPF_p)

Übertragungsmedium (kondensationsseitig)	Luft	Luft	Wasser	Wasser
Nennkälteleistung [kW]	< 400	≥ 400	< 400	400 - 1500
Jahreszeitbedingter Primärleistungsfaktor (SPF _p)	2,38	2,62	3,33	3,81

Für weitere Technologien der Kälteversorgung liefert die Verordnung (EU) 2016/2281 als Mindestenergieeffizienzangabe die nachfolgend ausgeführten Raumkühlungs-Jahresnutzungsgrade. Diese Angaben sind seit dem 1. Januar 2021 für neue Produkte verbindlich. Nach aktuellem Kenntnisstand sind für wärmebetriebenen (fossil) Kälteerzeuger ebenfalls Messwerte zu erfassen, wenn sie in die Betrachtung der erneuerbaren Kälte aufgenommen werden sollen. Aus diesem Grund wird in Tabelle 9 lediglich auf strombetriebene Kälteerzeuger eingegangen.

„Raumkühlungs-Jahresnutzungsgrad“ ($\eta_{s,c}$) bezeichnet das in % angegebene Verhältnis zwischen dem von einem Kühlungsprodukt gedeckten jährlichen Bezugs-Jahreskühlbedarf der Kühlperiode und dem jährlichen Kühlenergieverbrauch, der um Beiträge berichtigt wird, die die Temperaturregelung und den Stromverbrauch der gegebenenfalls vorhandenen Grundwasserpumpe(n) widerspiegeln (EU COM 2016).

Gemäß der Berechnungsvorschrift der Europäischen Kommission ist der Raumkühlungs-Jahresnutzungsgrad im Sinne der Verordnung (EU) 2281/2016 identisch mit dem jahreszeitbedingten Primärleistungsfaktor. Da es sich bei dem Raumkühlungs-Jahresnutzungsgrad um eine Angabe in Prozent handelt, erfolgt lediglich die Division durch 100, um die Mindesteffizienzen für die weiterführende Betrachtung zu erlangen.

Tabelle 9: Raumkühlungs-Jahresnutzungsgrad $\eta_{s,c}$ und jahreszeitbedingter Primärleistungsfaktor SPF_p für verschiedene Kühlungsprodukte

Kälteversorgungssystem	$\eta_{s,c}$	SPF_p
Luft-Wasser-Kühler mit einer Nennkühlleistung < 400 kW bei Antrieb mit einem Elektromotor	161	1,61
Luft-Wasser-Kühler mit einer Nennkühlleistung ≥ 400 kW bei Antrieb mit einem Elektromotor	179	1,79
Wasser/Sole-Wasser-Kühler mit einer Nennkühlleistung < 400 kW bei Antrieb mit einem Elektromotor	200	2,00
Wasser/Sole-Wasser-Kühler mit Nennkühlleistung 400 - 1500 kW bei Antrieb mit einem Elektromotor	252	2,52
Mit einem Elektromotor betriebene Luft-Luft-Raumklimageräte, mit Ausnahme von Rooftop-Raumklimageräten	189	1,89
Rooftop-Raumklimageräte	138	1,38

Quelle: EU COM 2016

Bestimmung der Kühlgradtage (CDD – cooling degree days)

Die Richtlinie zur Berechnung der erneuerbaren Kälte erlaubt die Unterteilung eines Mitgliedstaates in mehrere Klimazonen, um durch die Verwendung mehrerer Angaben für die Kühlgradtage ein präziseres Endergebnis zu erzielen. Für die klimatischen Verhältnisse in Deutschland ist diese Vorgehensweise nicht notwendig. Die Kühlgradtage des Bezugsjahres werden für das gesamte Land gemittelt errechnet. Idealerweise sollten diese Daten gewichtet ermittelt werden. Allerdings liegen keine empirischen Daten zur regionalen Verteilung der Geräte in Deutschland vor. In der Umsetzung wird auf Daten des deutschen Wetterdienstes zurückgegriffen. Dieser veröffentlicht monatlich Daten zu den Kühlgradtagen an einer Vielzahl von Wetterstationen in Deutschland. Auch das Statistische Amt der Europäischen Union (Eurostat) erhebt Daten für die Kühlgradtage. Diese Daten sind jedoch nicht für die Berechnung der erneuerbaren Kälte gemäß der Richtlinie verwendbar, da die Bezugstemperatur in diesen Daten bei 24 °C statt 18 °C liegt.

Berechnung der äquivalenten Vollaststunden (EFLH – equivalent full load hours)

Für die Berechnung der äquivalenten Vollaststunden auf Basis der Kühlgradtage werden Standardformeln aus Anhang VII verwendet. Dabei steht für folgende Teilbereiche eine eigene Berechnungsformel zur Verfügung (EU COM 2021):

- ▶ Raumkühlung im Wohngebäudesektor: $EFLH = 96 + 0,85 * CDD$
- ▶ Raumkühlung im tertiären Sektor: $ELFH = 475 + 0,49 * CDD$
- ▶ Prozesskühlung: $ELFH = t_s * (7300 + 0,32 * CDD)$

Bei Betrachtung der Formeln fällt auf, dass die Raumkühlung im Wohngebäudesektor stärker von der Anzahl der Kühlgradtage abhängt als die Raumkühlung im tertiären Sektor. Letztere ist jedoch durch einen höheren Basiswert gekennzeichnet.

Für die Berechnung der äquivalenten Vollaststunden in der Prozesskühlung ist zusätzlich die Angabe eines Aktivitätsfaktors erforderlich. Der Aktivitätsfaktor gibt an, wie lange die Anwendung in der Prozesskühlung bezogen auf das Bezugsjahr im Betrieb war (z.B. Betrieb an

allen Tagen des Jahres $t_s=1$, Betrieb an fünf Tagen in der Woche $t_s = 0,714$). Für den Aktivitätsfaktor gibt es keinen Standardwert. Er muss auf der Grundlage von Erhebungen in der Industrie ermittelt werden.

Berechnung des Kältebedarfs (Q_c – cooling supply)

Für die Berechnung des Kältebedarfs innerhalb des betrachteten Verbrauchssektor wird die Summe der Nennkühlleistungen mit den äquivalenten Vollaststunden multipliziert.

$$Q_c = P_c * EFLH$$

Berechnung der erneuerbaren Kälteenergiemenge (E_{RES-C} – Renewable energy quantity)

Zunächst muss der Anteil der bereitgestellten Kälteenergie ermittelt werden, der gemäß den Anforderungen des SPF_p als erneuerbar angesehen werden kann. Dazu wird der ermittelte jahreszeitbedingte Primärleistungsfaktor der Kühlsysteme folgender Berechnung unterzogen:

$$s_{SPF,p} = \frac{SPF_p - SPF_{p,LOW}}{SPF_{p,High} - SPF_{p,Low}} \%$$

Die Schwellenwerte für diesen Berechnungsansatz wurden im Rahmen von Sachverständigensitzungen festgelegt und liegen bei $SPF_{p,Low} = 1,4$ und $SPF_{p,High} = 6$.

Damit die bereitgestellte Kühlenergie anteilig als erneuerbar gilt, muss das Kühlsystem einen jahreszeitbedingten Primärleistungsfaktor von mindestens 1,4 aufweisen. Bei Werten oberhalb von 6 zählt die gesamte Energie als erneuerbar. Für die übrigen Systeme wird der aus der Berechnung resultierende Prozentsatz $s_{SPF,p}$ mit dem ermittelten Kältebedarf multipliziert und so der Anteil der erneuerbaren Kälteenergie ermittelt.

$$E_{RES-C} = Q_c * s_{SPF,p}$$

Wird das Kälteversorgungssystem zu 100 % mit erneuerbarer Wärme betrieben, ist die gesamte bereitgestellte Kühlenergie als erneuerbar zu betrachten.

3.5.2 Kälteerzeuger über 1,5 MW

Bei Kältesystemen mit einer Nennkühlleistung von mehr als 1,5 MW sowie Systemen, für die keine Standardwerte aus den Mindesteffizienzvorgaben der Europäischen Union abgeleitet werden können und wärmebetriebenen (fossil) Kälteerzeuger, muss die Berechnung der eingesetzten erneuerbaren Energie auf Basis von Messwerten erfolgen. Im Zentrum der Betrachtungen stehen dabei die gemessene Energiezufuhr und die gemessene bereitgestellte Kühlenergie.

Die **Energiezufuhr** umfasst alle Energiequellen der Kälteversorgungssysteme, einschließlich etwaiger Kälteerzeuger. Darüber hinaus wird für die Kälteversorgungssysteme die Energiezufuhr für Hilfspumpen und -ventilatoren bestimmt (EU COM 2021). Nicht berücksichtigt wird hingegen die Verteilung der Kälte an ein Gebäude oder Prozess (EU COM 2021).

Die bereitgestellte **Kühlenergie** wird am Ausgang des Kälteversorgungssystems ermittelt. Auftretende Kälteverluste werden abgezogen, um die bereitgestellte Nettokühlenergie bei den Verbraucher*innen zu ermitteln. Verluste treten insbesondere im Kälteverteilungssystem bei einem Gebäude oder Industriestandort auf.

Die Messung dieser beiden Größen muss für das gesamte Meldejahr durchgeführt werden. Entsprechende Datenerfassungen finden gegenwärtig nicht flächendeckend statt.

3.5.3 Fernkälteversorgung

Die Berechnung der in Fernkältesystemen genutzten erneuerbaren Energie erfolgt auf Basis von Messwerten. Dabei ergeben sich zusätzliche Anforderungen an die Vorgehensweise gegenüber der Betrachtung von Kälteerzeugern über 1,5 MW.

Der jahreszeitbedingte Primärleistungsfaktor SPF_p wird ohne Verteilungsverluste bestimmt. Das bedeutet im Falle der Fernkälteversorgung, dass verteilungsbedingte Kälteverluste und der Stromverbrauch der Verteilungspumpen nicht in die Bestimmung des SPF_p einbezogen werden (EU COM 2021). Somit wird das Fernkältesystem in Teilbereiche untergliedert. Diese Teilbereiche beinhalten jeweils mindestens einen Kälteerzeuger oder mindestens ein freies Kühlsystem.

Es wird eine Unterscheidung zwischen Nettokälteversorgung und Bruttokälteversorgung getroffen. Zur Berechnung der Nettokälteversorgung müssen die thermischen Verluste im Verteilungsnetz abgezogen werden:

$$Q_{C,Supply,net} = Q_{C,Supply,gross} - Q_{C,Loss}$$

Dabei ist die bereitgestellte Kühlenergie und die Energiezufuhr für jedes Teilsystem zu messen (EU COM 2021). Die auftretenden Verluste sind den Teilsystemen wie folgt zuzuweisen:

$$Q_{C,Supply,net,i} = Q_{C,Supply,gross,i} * \left(1 - \frac{Q_{C,Loss}}{\sum_{i=1}^n Q_{C,Supply,gross,i}}\right)$$

Hilfsvorrichtungen (z.B. Regelgeräte und Pumpen) der Kältesysteme werden in das jeweilige Teilsystem einbezogen. Allerdings wird die Hilfsenergie, für die Verteilung der Kälte innerhalb eines Gebäudes (z.B. Hilfspumpen oder Gebläsekonvektoren) nicht berücksichtigt.

Es können Hilfsvorrichtungen vorhanden sein, die keinem Teilsystem zugeordnet werden können, z.B. Pumpen des Fernkältenetzes, die die von allen Erzeugern gelieferte Kühlenergie bereitstellen (EU COM 2021). Der entsprechende Energieverbrauch wird gemäß dem Verhältnis von bereitgestellter Kühlenergie des Teilsystems zu insgesamt bereitgestellter Kühlenergie gemäß der folgenden Formel jedem Teilsystem angerechnet:

$$E_{INPUT,AUX,i} = E_{INPUT,AUX1,i} + E_{INPUT,AUX2} * \frac{Q_{C,Supply,net,i}}{\sum_{i=1}^n Q_{C,Supply,net,i}}$$

3.6 Anzustrebende Ergebnisstruktur

Die Berechnungsergebnisse für die zur Kälteversorgung genutzte Energie sind nachfolgend dem Gesamtanteil der erneuerbaren Energie anzurechnen. Hierbei erfolgt die Addition der zur Kälteversorgung genutzten erneuerbaren Energie zum Zähler „Bruttoendenergieverbrauch von Energie aus erneuerbaren Quellen“ als auch zum Nenner „Bruttoendenergieverbrauch“ (EU COM 2021).

Das Berechnungsergebnis ist darüber hinaus relevant für die Berechnung der Gesamtanteile der für die Wärme- und Kälteversorgung genutzten erneuerbaren Energie (EU COM 2021). Hierbei wird die zur Kälteversorgung genutzten erneuerbaren Energie dem Zähler „Bruttoendenergieverbrauch von Energie aus erneuerbaren Quellen für die Wärme- und Kälteversorgung“ als auch dem Nenner „Bruttoendenergieverbrauch für die Wärme- und Kälteversorgung“ angerechnet.

Im Zuge der Berichterstattung an das Europäische Statistikamt (Eurostat) erfolgt die Darstellung der Berechnungsergebnisse entsprechend der Ergebnisstruktur des SHARES-Tools (Short Assesment of Renewable Energy Sources) unter dem Reiter „Renewable Cooling“. Innerhalb des Tools sind verschiedene Eingangsparameter der Berechnung anzugeben, während sich das

Ergebnis für die zur Kälteversorgung genutzten erneuerbaren Energie auf Basis der hinterlegten Formeln (vgl. Kapitel 3.5) automatisch ergibt.

Für Kälteerzeuger mit einer Nennkühlleistung von über 1,5 MW ist innerhalb des SHARES-Tools die Angabe der durchschnittlichen gemessenen SPF_p und des gemessenen Kältebedarfs (nutzbare Kälteabgabe) erforderlich. Im Anschluss ergibt sich die zur Kälteversorgung genutzten erneuerbaren Energie automatisch.

Für die Kälteerzeuger mit einer Nennkühlleistung von unter 1,5 MW wird die Ergebnisstruktur weiter unterteilt in Raumkühlung in Wohngebäuden, Raumkühlung im tertiären Sektor und Prozesskühlung. Innerhalb der Sektoren muss zunächst eine Eingabe zu den Kühlgradtagen erfolgen. Darüber ist die Nennkühlleistung des Anlagenbestandes erforderlich, sowie der Anteil (in Absolutzahlen) des durch erneuerbare Wärme betriebenen Anlagenbestandes in Relation zur gesamten Nennkühlleistung. Darüber hinaus ist die Angabe des durchschnittlichen SPF_p erforderlich. Die übrigen Berechnungsgrößen werden im Anschluss automatisch ermittelt. Im Sektor der Prozesskühlung ist zudem der Aktivitätsfaktor zu ergänzen.

Darüber hinaus besteht die Option sonstige Kälteversorgungssysteme in der Kategorie "other individual cooling" zu melden. Hierbei ist die Ergebnisstruktur deckungsgleich mit der für Kälteerzeuger mit einer Nennkühlleistung von mehr als 1,5 MW.

Die Ergebnisstruktur des SHARES-Tools umfasst auch die Fernkälteversorgung. Hier ist der gemessene SPF_p anzugeben. Darüber hinaus erfolgt die Unterscheidung von Brutto- und Nettokälteversorgung, wobei im Hinblick auf die Nettokälteversorgung nochmal die Abgrenzung der wärmebetriebenen Kälteversorgung erfolgt.

An sämtlichen Stellen, die die Angabe eines SPF_p erfordern, unabhängig davon, ob dieser gemessen oder auf Basis von Standard-Werten ermittelt wird, wird ein SPF_p über den gesamten Anlagenbestand gebildet und ein weiterer, der nur die Anlagen mit einem SPF_p oberhalb des Schwellenwertes von 1,4 umfasst.

4 Methodenentwicklung zur Abbildung der erneuerbaren Kälte

Zentraler Bestandteil der Methodenentwicklung zur Berücksichtigung erneuerbarer Energien für die Kälteversorgung war die Entwicklung eines Excel-Schätzmodells. Ziel war es, das Schätzmodell so anzulegen, dass es vom Auftraggeber jährlich mit öffentlich verfügbaren Daten aktualisiert werden kann.

In diesem Kapitel wird die entwickelte Methodik zur Abschätzung der erneuerbaren Kälte umfassend beschrieben. Dabei werden sämtliche Berechnungsschritte nachvollziehbar dargestellt und die Datenquellen für die notwendigen Eingangsparameter benannt. Aufgrund der unzureichenden Datenbasis mussten für einige Berechnungsgrößen Annahmen getroffen werden. Zur Validierung der getroffenen Annahmen wurden Fachinterviews mit Vertreter*innen folgender Institutionen geführt:

- ▶ Technische Universität Wien
- ▶ Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung (RWI Essen)
- ▶ Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI)
- ▶ AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.
- ▶ Institut für Luft- und Kältetechnik (ILK Dresden)
- ▶ Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien GmbH (IREES)

Relevante Erkenntnisse aus den Fachinterviews wurden in das Schätz-Modell aufgenommen und tragen maßgeblich zu der Qualitätssicherung der entwickelten Methodik bei.

Grundsätzlich ist darauf hinzuweisen, dass die Anwendung der Berechnungsvorschrift der Europäischer Kommission für Deutschland mit erheblichen Problemen verbunden ist, da die erforderliche Datenbasis nicht oder nur teilweise vorhanden ist. Die im Folgenden erläuterte Methodik wurde mit dem Ziel entwickelt, die Datenlücken auf Basis von Annahmen aus europäischen Erhebungen und eigenen Annahmen bestmöglich zu schließen, um eine möglichst genaue Abschätzung der erneuerbaren Kälte in Deutschland vornehmen zu können.

Die Ergebnisse der Berechnungen werden im Anschluss an die Methodenbeschreibung umfassend dargestellt und kritisch diskutiert. Darüber hinaus erfolgt ein Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den bisherigen Datenmeldungen anderer Mitgliedstaaten zur erneuerbaren Kälte auf Basis des SHARES-Tools.

4.1 Anwendungsbereich der Methodik

Bereits die Berechnungsvorschrift der Europäischen Kommission nimmt eine umfassende Eingrenzung der für die erneuerbare Energie in der Kälteversorgung relevanten Anwendungsbereiche vor. Diese Abgrenzungen wurden in Kapitel 3.3 ausführlich erläutert.

Beim Abgleich der abzugrenzenden Anwendungsbereiche mit den vorliegenden Studien zum Energieverbrauch in den verschiedenen Sektoren der Kälteversorgung (vgl. Kapitel 3.4) konnten weitere Unsicherheiten im Hinblick auf den Anwendungsbereich der Richtlinie festgestellt werden. In Abstimmung mit dem Auftraggeber finden folglich sämtliche Anwendungen, die in den Sektor Prozesskälte fallen würden, keine Berücksichtigung bei der Abschätzung.

Insbesondere ist hier auf die Wechselwirkung zwischen Prozesskühlung und der immer relevanter werdenden Abwärmenutzung hinzuweisen. Wie sich diese Anwendungen perspektivisch gegenseitig beeinflussen, kann nach heutigem Kenntnisstand nicht abgeschätzt werden. Darüber hinaus wäre für die Betrachtung der Prozesskälte eine Erhebung hinsichtlich des Aktivitätsfaktors (vgl. Kapitel 3.5.1) erforderlich. Eine entsprechende Befragung von Industrieunternehmen wäre mit einem nicht unerheblichen Aufwand verbunden. Diese Einschätzung zum Umgang mit dem Sektor Prozesskälte wird durch die Tatsache untermauert, dass bisher kein Mitgliedstaat eine Datenmeldung in diesem Anwendungsbereich vorgenommen hat.

Letztlich verbleiben die nachfolgenden Bereiche der Kälteversorgung für die gesicherte Betrachtung durch das Schätz-Modell:

- ▶ Klimatisierung in Wohngebäuden
- ▶ Klimatisierung in Gewerbe, Handel und Dienstleistungen
- ▶ (Klimatisierung in Industrie)
- ▶ Fernkälteversorgung

Zudem wird in diesen Bereichen nur die strombetriebene Kälteversorgung berücksichtigt. Nach dem gegenwärtigen Verständnis der Berechnungsvorschrift ist die Betrachtung der erneuerbaren Kälte von wärmebetriebenen Kälteerzeugern auf Basis von fossilen Energieträgern nur anhand von Messwerten zulässig. Eine Ausnahme hierzu bilden Kälteerzeuger, die durch erneuerbare Wärme betrieben werden. Im Rahmen der Literaturrecherche konnten jedoch keine Informationen über den Bestand entsprechender Anlagen ermittelt werden. Der Marktanteil von wärmebetriebenen Kälteerzeugern ist jedoch vergleichsweise gering, so dass auch die Relevanz der Betrachtung entsprechender Anlagen im Einfluss auf das Endergebnis der Abschätzung als gering eingeschätzt werden kann. In Europa wird den Kompressionskältemaschinen ein Marktanteil von 99 % in der Raumklimatisierung zugeschrieben (Elnagar et al. 2023).

Die Klimatisierung in der Industrie ist ebenfalls Gegenstand des im Forschungsvorhaben entwickelten Schätz-Modells, unterliegt allerdings zusätzlichen Unsicherheiten bezüglich der Anrechenbarkeit. Einerseits ergeben sich Unklarheiten in der Abgrenzung von klimatisierten Industriegebäuden des produzierenden Gewerbes gegenüber der Prozesskühlung, andererseits wird in der Berechnungsvorschrift der Europäischen Kommission lediglich die Raumklimatisierung in Wohngebäuden und dem tertiären Sektor behandelt. Nach der gegenwärtigen Einschätzung bezeichnet der tertiäre Sektor den Bereich der Wirtschaft, der keine Sachgüter produziert. Dementsprechend kann die Klimatisierung von Industriehallen nicht in die Abschätzung der erneuerbaren Kälte aufgenommen werden.

Ein weiterer Sonderfall, der in der entwickelten Methodik nicht berücksichtigt wird, ist das Kühlen mit Wärmepumpen, die aber auf Grund zunehmender Verbreitung zukünftig ggf. einer steigenden Relevanz unterliegt.

4.2 Raumklimatisierung

In diesem Abschnitt wird die Methodik zur Abschätzung der erneuerbaren Kälte in der Raumklimatisierung erläutert, die in Anlehnung an die Berechnungsvorschrift der Europäischen Kommission entwickelt wurde. Die nachfolgende Abschätzung entspricht dabei der Betrachtung

der Kälteerzeuger mit einer Nennkühlleistung von unter 1,5 MW auf Basis von Standardwerten für die Anlageneffizienz aus den Ökodesign-Verordnungen.

4.2.1 Methodik

Die Ausgangswerte für die entwickelte Methodik stammen aus den Anwendungsbilanzen der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen. Dabei wird der Endenergieverbrauch für den Energieträger Strom in der Klimatisierung für die Verbrauchssektoren Wohngebäuden (bzw. Private Haushalte), GHD und Industrie zugrunde gelegt. Die Erhebungen für die Sektoren Industrie und GHD stammen vom Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung (Rohde et al. 2023), die Erhebungen für Sektoren Wohngebäude und Verkehr vom Leibnitz-Institut für Wirtschaftsforschung (Frondel et al. 2023). Der Sektor Verkehr fällt unter die instationäre Kälteerzeugung und wird daher nicht weiter betrachtet (vgl. Kapitel 3.3).

Entgegen der Berechnungsvorschrift der Europäischen Kommission bildet somit nicht die Nennkühlleistung des Anlagenbestandes den Ausgangspunkt der Betrachtungen. Hierzu konnte keine gesicherte Datengrundlage identifiziert werden. Vorhandene Abschätzungen zur Anzahl der Kältesysteme in Deutschland (z.B. Preuß 2019) lassen keine zuverlässigen Rückschlüsse auf die Verteilung der Anlagentypen und der Anlagenleistung zu. Eine eigenständige Fortschreibung der in den entsprechenden Studien ermittelten Endenergieverbräuche wurde ebenfalls ausgeschlossen, da der Betrachtungszeitraum der Publikationen häufig mehrere Jahre zurückliegt und die Publikationen selbst eine Doppelzählung von Anlagen in verschiedenen Sektoren nicht ausschließen können. Dementsprechend verfolgt die vorliegende Methodik das Ziel, zunächst die installierte Leistung des Anlagenbestandes in den Verbrauchssektoren auf Basis der Endenergieverbräuche und einer gemittelten Anzahl von Kühlgradtagen näherungsweise zu berechnen. Im Anschluss wird unter Anwendung der berechneten installierten Leistung und den jahresspezifischen Kühlgradtagen ein von den Witterungsbedingungen abhängiger Kältebedarf modelliert. Unter Berücksichtigung der Effizienzparameter des Anlagenbestandes kann schließlich auf Basis des witterungsabhängigen Kältebedarfs die Menge der zur Kälteversorgung genutzten erneuerbaren Energie berechnet werden. Damit entspricht die vorliegende Methodik ab dem Punkt, an dem auf Basis der Leistung des Anlagenbestandes gerechnet wird, vollständig den Berechnungsvorschriften der Europäischen Kommission.

Als Ausgangswerte für die Abschätzung wurden die Anwendungsbilanzen verwendet, da es sich hierbei um die einzige jährliche Erhebung des Endenergieverbrauches der Kälteversorgung handelt. Die Belastbarkeit der Erhebungen muss jedoch kritisch betrachtet werden. So wird beispielsweise in den Betrachtungen des RWI Essen zu den Sektoren Wohngebäude und Verkehr die Klimakälte nur als Restgröße erfasst. Zudem werden für die Erstellung der Anwendungsbilanzen Erhebungsstudien zum Energieverbrauch privater Haushalte zugrunde gelegt, die zuletzt im Jahr 2015 aktualisiert worden sind. Neuere Entwicklungen in der Gebäudeausstattung (z.B. Kälteversorgung auf Basis von Wärmepumpen im Umkehrbetrieb) sind daher in dieser Erhebung nicht berücksichtigt. Mit Blick auf die nachfolgend dargestellten Ausgangsdaten (vgl. Tabelle 10) wird insbesondere die Reduktion des Endenergieverbrauchs im Sektor GHD zwischen den Jahren 2021 und 2022 kritisch hinterfragt. Darüber hinaus ist zu beachten, dass mit der Publikation aus dem Jahr 2023 (Rohde et al. 2023) die Erhebungsmethodik optimiert wurde, weshalb die Zeitreihe ab 2019 nicht konsistent zu den vorherigen Zahlenwerten ist. Da in der nachfolgend beschriebenen Methodik lediglich die Betrachtungsjahre 2021 und 2022 behandelt werden, stützt sich die Methodik auf die aktualisierte Zeitreihe.

Das Schätzmodell ist so konzipiert, dass der Auftraggeber jährlich die aktuellen Endenergieverbräuche aus den Anwendungsbilanzen in das Modell integriert. Innerhalb des Modells erfolgt dann zunächst die Umrechnung der Angaben in die Einheit Gigawattstunden. Die entsprechenden Daten für die Betrachtungsjahre 2021 und 2022 sind in Tabelle 10 aufgeführt.

Tabelle 10: Endenergieverbrauch Klimatisierung (nur Strom) gemäß Anwendungsbilanzen für die Verbrauchssektoren Wohngebäude, GHD und Industrie (AGEB 2023)

Verbrauchssektor	Betrachtungsjahr	Endenergieverbrauch [PJ]	Endenergieverbrauch [GWh]
Wohngebäude	2021	5,0	1.389
	2022	5,0	1.389
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	2021	30,2	8.389
	2022	29,0	8.056
Industrie	2021	17,3	4.806
	2022	17,4	4.833

Da gemäß den Schwellenwerten der Europäischen Kommission nur Kälteerzeuger mit einem jahreszeitbedingten Primärleistungsfaktor (SPF_p) von mehr als 1,4 in der Betrachtung der erneuerbaren Kälte zu berücksichtigen sind, musste der Endenergieverbrauch aus den Anwendungsbilanzen zunächst dahingehend bereinigt werden. Im Zuge der Fachinterviews und der Studie zur Entwicklung der Berechnungsvorschrift (Pezutto et al. 2021) wurde deutlich, dass mobile Raumklimageräte nicht die vorgegebene Mindesteffizienz leisten können. Dementsprechend wurde der Endenergieverbrauch von mobilen Raumklimageräten in den Verbrauchssektoren subtrahiert (vgl. Tabelle 11). Die zugrundeliegenden Überlegungen zur Anlagenverteilung in den Sektoren werden in Tabelle 19 dargestellt. Selbiges gilt für die Anlagenart der Rooftop-Raumklimageräte, die gemäß der in Tabelle 9 aufgeführten Effizienzkennwerte nicht die vorgegebene Mindesteffizienz erreichen. Diese Anlagenart ist nur in der Betrachtung der Verbrauchssektoren Gewerbe, Handel, Dienstleistungen sowie Industrie relevant.

Tabelle 11: Endenergieverbrauch Klimatisierung (nur Strom) für die Verbrauchssektoren abzüglich der Kälteerzeuger mit einem SPF_p < 1,4

Verbrauchssektor	Betrachtungsjahr	Endenergieverbrauch [GWh]	Endenergieverbrauch von Anlagen mit SPF _p > 1,4 [GWh]
Wohngebäude	2021	1.389	1.283
	2022	1.389	1.283
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	2021	8.389	6.208
	2022	8.056	5.961
Industrie	2021	4.806	3.628
	2022	4.833	3.649

Im nächsten Schritt der Abschätzung wird aus dem bereinigten Endenergieverbrauch ein Kältebedarf berechnet. Die Umrechnung erfolgt hierbei auf Basis der Effizienz des

Anlagenbestandes in den Verbrauchssektoren. Es wird davon ausgegangen, dass das Verhältnis zwischen Endenergieverbrauch und Kältebedarf durch die Arbeitszahl im Kühlbetrieb abgebildet wird (vgl. Kapitel 3.5.1). Das in der Tabelle 12 dargestellte Verhältnis von Endenergieverbrauch und Kältebedarf ergibt sich aus den nachfolgend erläuterten Annahmen zur Anlageneffizienz und Anlagenverteilung. Vor dem Hintergrund bisheriger Untersuchungen zum Verhältnis von Endenergieverbrauch und Kältebedarf (Steinbach et al. 2021) und den Erkenntnissen aus den Fachinterviews wird die resultierende Arbeitszahl als realistisch eingeschätzt.

Tabelle 12: Berechnung des Kältebedarfs in den Verbrauchssektoren basierend auf dem bereinigten Endenergieverbrauch

Verbrauchssektor	Betrachtungs-jahr	Endenergieverbrauch von Anlagen mit $SPF_p > 1,4$ [GWh]	Verhältnis Endenergieverbrauch/Kältebedarf	Kältebedarf [GWh]
Wohngebäude	2021	1.283	4,29	5.504
	2022	1.283	4,29	5.504
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	2021	6.208	4,04	25.110
	2022	5.961	4,04	24.112
Industrie	2021	3.628	4,05	14.681
	2022	3.649	4,05	14.766

Der berechnete Kältebedarf ist nun weiteren Korrekturen zu unterziehen. Da die Berechnung der in der Kälteversorgung genutzten erneuerbaren Energie in der Fernkälteversorgung separat erfolgt, ist zunächst die durch die Fernkälteversorgung bereitgestellte Kälteenergie von dem Kältebedarf in den jeweiligen Verbrauchssektoren abzuziehen. In diesem Zusammenhang mussten Annahmen darüber getroffen werden, in welchen Verbrauchssektoren die Fernkälteversorgung zum Einsatz kommt. Diese Annahmen wurden im Zuge der Fachinterviews validiert.

Tabelle 13: Kältebedarf in den Verbrauchssektoren abzüglich der durch Fernkälteversorgung bereitgestellten Kühlenergie

Verbrauchssektor	Betrach-tungsjahr	Kältebedarf [GWh]	Nutzbare Kälteabgabe (nur KMM) durch Fernkältenetze über alle Verbrauchssektoren [GWh]	Verteilung der nutzbaren Kälteabgabe auf die Verbrauchs-sektoren	Kältebedarf abzüglich Fernkälteversorgung [GWh]
Wohngebäude	2021	5.504	(241,0)	0 %	5.504
	2022	5.504	(203,5)	0 %	5.504
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	2021	25.110	(241,0)	85 %	24.905
	2022	24.112	(203,5)	85 %	23.939
Industrie	2021	14.681	(241,0)	15 %	14.645
	2022	14.766	(203,5)	15 %	14.735

Ein weiterer zentraler Berechnungsschritt ergibt sich zudem aus der Einschränkung, dass für ein vereinfachtes Verfahren zur Erfassung erneuerbarer Kälte nur Kälteerzeuger mit einer Nennkühlleistung von weniger als 1,5 MW berücksichtigt werden können. In diesem Kontext mussten demnach Annahmen darüber getroffen werden, welcher Anteil des Kältebedarfs in den Verbrauchssektoren durch Anlagen mit einer entsprechenden Nennkühlleistung gedeckt wird. Diese Annahmen wurden im Zuge der Fachinterviews validiert. Es ist jedoch anzumerken, dass auch die Forschenden aus dem Bereich der Kältetechnik diesbezüglich nur grobe Abschätzungen vornehmen konnten.

Tabelle 14: Berechnung des mit einer Nennkühlleistung von unter 1,5 MW bereitgestellten Kältebedarfs in den Verbrauchssektoren

Verbrauchssektor	Betrach-tungsjahr	Kältebedarf [GWh]	Anteil der Anlagen mit einer Nennkühlleistung < 1,5 MW	Kältebedarf (< 1,5 MW) [GWh]
Wohngebäude	2021	5.504	100 %	5.504
	2022	5.504	100 %	5.504
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	2021	24.905	60 %	14.943
	2022	23.939	60 %	14.363
Industrie	2021	14.645	40 %	5.858
	2022	14.735	40 %	5.894

Im nächsten Schritt der Abschätzung werden die Kühlgradtage in Deutschland betrachtet. Dabei handelt es sich um eine elementare Berechnungsgröße, da aus den über die Jahre 2014 bis 2023 gemittelten Kühlgradtagen die äquivalenten Vollaststunden abgeleitet werden, auf deren Basis aus dem zuvor berechneten Kältebedarf die installierte Leistung des Anlagenbestandes (Nennkühlleistung < 1,5 MW) in den jeweiligen Verbrauchssektoren berechnet wird.

Die zugrunde liegenden Daten für die Kühlgradtage in Deutschland stammen vom Deutschen Wetterdienst (DWD). Die Bezugstemperatur ist hierbei, im Einklang mit der Berechnungsvorschrift der Europäischen Kommission, auf 18 °C gesetzt. Die Anzahl der relevanten Messstationen des deutschen Wetterdienstes in Deutschland schwankt über die Jahre 2014 bis 2023 im Bereich von 449 bis 506. Die gemessenen Kühlgradtage der einzelnen Stationen wurden im Anschluss über sämtliche Betrachtungsjahre gemittelt. Eine Gewichtung nach der Beschäftigten- oder Einwohnerzahl im Umkreis der jeweiligen Messstation wurde nicht vorgenommen. Für die Abschätzung sind zusätzlich die gemittelten Kühlgradtage für die Betrachtungsjahre 2021 und 2022 relevant. In Tabelle 15 werden die Ergebnisse zu den Kühlgradtagen und äquivalenten Vollaststunden zusammenfassend dargestellt. Die Berechnung der äquivalenten Vollaststunden basiert hierbei auf den Formeln aus der Berechnungsvorschrift der Europäischen Kommission (vgl. Kapitel 3.5.1). Zu ergänzen ist, dass für die Betrachtung der Klimatisierung im Sektor Industrie keine Formel angegeben ist. Vereinfachend wurde deshalb die Formel für den tertiären Sektor ebenfalls auf die Raumklimatisierung im Industriesektor angewandt.

Tabelle 15: Mittelwert Kühlgradtage, Kühlgradtage in den Betrachtungsjahren, äquivalente Vollaststunden in den Verbrauchssektoren

Verbrauchssektor	Mittelwert Kühlgradtage (2014-2023) [K*d]	Äquivalente Vollaststunden (2014-2023) [h]	Betrachtungsjahr	Kühlgradtage [K*d]	Äquivalente Vollaststunden [h]
Wohngebäude	240	300	2021	169	240
			2022	279	332
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen		593	2021	169	558
			2022	279	612
Industrie		593	2021	169	558
			2022	279	612

Im nächsten Berechnungsschritt des Schätz-Modells kann auf Basis des bereinigten Kältebedarfs und der äquivalenten Vollaststunden gemittelt über die Jahre 2014 bis 2023 die installierte Leistung der Anlagen innerhalb der Verbrauchssektoren, die die Rahmenbedingungen zur Berücksichtigung bei der Berechnung der erneuerbaren Kälte erfüllen, berechnet werden.

Tabelle 16: Berechnung der installierten Leistung von Kälteversorgungssystemen in den Verbrauchssektoren

Verbrauchssektor	Betrachtungsjahr	modellierter Kältebedarf [GWh]	Äquivalente Vollaststunden (2014-2023) [h]	Installierte Leistung [GW]
Wohngebäude	2021	5.504	300	18,3
	2022	5.504		18,3
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	2021	14.943	593	25,2
	2022	14.363		24,2
Industrie	2021	5.858	593	9,9
	2022	5.894		9,9

Der Rückgang der installierten Leistung im Sektor GHD zwischen den Betrachtungsjahren ist maßgeblich auf die Verringerung des Endenergieverbrauchs innerhalb der Anwendungsbilanzen zurückzuführen und steht sehr wahrscheinlich nicht im Einklang mit der tatsächlichen Entwicklung des Anlagenbestandes.

Auf Basis der installierten Leistung kann im nächsten Berechnungsschritt unter Verwendung der jahresspezifischen äquivalenten Vollaststunden der Kältebedarf für die einzelnen Betrachtungsjahre berechnet werden.

Tabelle 17: Berechnung des witterungsabhängigen Kältebedarfs in den Verbrauchssektoren

Verbrauchssektor	Betrachtungsjahr	Installierte Leistung [GW]	Äquivalente Vollaststunden [h]	witterungsabhängiger Kältebedarf [GWh]
Wohngebäude	2021	18,3	240	4.397
	2022	18,3	332	6.096
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	2021	25,2	558	14.066
	2022	24,2	612	14.827
Industrie	2021	9,9	558	5.514
	2022	9,9	612	6.084

Unter Anwendung der jahreszeitbedingten Primärleistungsfaktoren (SPF_p) des Anlagenbestandes kann letztlich aus dem witterungsabhängigen Kältebedarf die für die Kälteversorgung genutzte erneuerbare Energie abgeschätzt werden.

Der jahreszeitbedingte Primärleistungsfaktor des Anlagenbestandes in den jeweiligen Verbrauchssektoren ergibt sich aus den Standardwerten zu den Effizienzen der einzelnen Anlagenarten auf Basis der Ökodesign-Verordnungen und der prozentualen Verteilungen der Anlagenarten. Die Herleitung des jahreszeitbedingten Primärleistungsfaktor auf Basis der vorgegebenen Mindesteffizienzen ist Kapitel 3.5.1 dargestellt.

Einen Sonderfall bei der Betrachtung der Effizienzkennwerte stellen die mobilen Raumklimageräte dar. Es wird davon ausgegangen, dass auch für diese Anlagen die Vorgaben zu der Effizienz von Raumklimageräten gemäß Verordnung (EU) 206/2012 gelten, diese jedoch nur unter Laborbedingungen und nicht in der alltäglichen Praxis erreicht werden können. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der klassischen Anwendung eines mobilen Raumklimagerätes in der Regel ein Abluftschlauch durch ein Fenster nach außen geführt wird. Indem Luft aus dem zu kühlenden Raum nach außen geführt wird, entsteht ein Unterdruck im Raum, wodurch wiederum warme Außenluft durch die Fensteröffnung angezogen wird (Pezutto et al. 2021). Dieser Umstand ist maßgeblich für die Verringerung der Effizienz mobiler Raumklimageräte verantwortlich. Eine Abschätzung zu der tatsächlichen Effizienz mobiler Raumklimageräte kann Tabelle 18 entnommen werden. Für den Industriesektor wird hierbei keine Angabe gemacht, da keine Erkenntnisse über die Anwendung mobiler Raumklimageräte in diesem Sektor vorliegen.

Tabelle 18: Jahreszeitbedingter Primärleistungsfaktor mobiler Raumklimageräte (Pezutto et al. 2021)

Anlagenart	Wohngebäude	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	Industrie
Mobile Raumklimageräte	0,91	1,14	-

Für die prozentuale Verteilung der Anlagenarten in den jeweiligen Verbrauchssektoren konnten keine belastbaren Erhebungen für Deutschland identifiziert werden. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle auf die europaweiten Erhebungen der Studie „Renewable Cooling under the Revised Renewable Energy Directive ENER/C1/2018-493“ (Pezutto et al. 2021) zurückgegriffen. Die in Tabelle 19 aufgeführte prozentuale Verteilung basiert nicht auf der Anzahl der jeweiligen Anlagenart in Relation zur Anzahl aller Kälteversorgungssysteme in dem Verbrauchssektor, sondern beschreibt den prozentualen Anteil der Anlagenart am Endenergieverbrauch für die Kälteversorgung des gesamten Verbrauchssektors.

Tabelle 19: Prozentuale Verteilung der Anlagenarten in den Verbrauchssektoren in Relation zum Endenergiebedarf

Anlagenart	Wohngebäude	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	Industrie
Mobile Raumklimageräte	7,6 %	2,0 %	0,0 %
Stat. Raumklimageräte (< 12 kW)	84,2 %	7,4 %	7,6 %
Luft-Wasser-Kühler (< 400 kW)	6,3 %	5,6 %	5,7 %
Luft-Wasser-Kühler (> 400 kW)	0 %	8,7 %	8,9 %
Wasser/Sole-Wasser-Kühler (< 400 kW)	0,9 %	1,6 %	1,6 %
Wasser/Sole-Wasser-Kühler (> 400 kW)	0,0 %	5,7 %	5,8 %
Luft-Luft-Raumklimageräte	1,0 %	45,1 %	46,0 %
Rooftop-Raumklimageräte	0,0 %	24,0 %	24,5 %

*Die Anlagenart Luft-Luft-Raumklimageräte beeinhaltet hierbei die sog. VRF-Systeme.

Hierbei ist zu vermerken, dass dieser Schritt der Abschätzung mit nennenswerten Unsicherheiten behaftet ist. Idealerweise wäre die Anlagenverteilung perspektivisch durch eine regionalisierte Betrachtung zu ergänzen. Die Einteilung der Anlagenarten in der europaweiten Erhebung unterscheidet sich teilweise von den in den Ökodesign-Verordnungen vorgenommenen Bezeichnungen der Anlagenarten, so dass an dieser Stelle eine eigenständige Zuteilung erfolgen musste. Diese Zuteilung wurde im Rahmen der Fachinterviews validiert.

Eine weitere Unschärfe ergibt sich im Hinblick auf den Anteil der mobilen Raumklimageräte im Verbrauchssektor GHD. Während in der Studie von Pezzutto et al. dieser Anlagenart lediglich 0,2 % des Endenergieverbrauchs zugeordnet wurde, geht aus den Erhebungen des Fraunhofer ISI zur Erstellung der Anwendungsbilanzen hervor, dass die Anzahl mobiler Kleinklimageräte in Relation zur Gesamtanzahl der Kälteversorgungssysteme im Verbrauchssektor GHD einen Anteil von 16 % ausmachen. Diese Diskrepanz konnte im Zuge des Projekts nicht in Einklang gebracht werden, weswegen vereinfachend die Annahme getroffen wurde, dass mobile Raumklimageräte einen Anteil von 2 % am Endenergieverbrauch für die Klimatisierung im GHD-Sektor ausmachen.

Darüber hinaus sei darauf verwiesen, dass die zugrundeliegende Studie lediglich die Anlagenverteilung in den Sektoren Wohngebäude und Gewerbe, Handel und Dienstleistungen betrachtet. Um eine Berechnung für den Sektor Industrie zu ermöglichen, wurde vereinfachend die Anlagenverteilung für den Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen übernommen. Ein Unterschied ergibt sich lediglich hinsichtlich des zuvor beschriebenen Einsatzes mobiler Raumklimageräte.

Die in Tabelle 19 aufgeführten prozentualen Anteile der mobilen Raumklimageräte und der Rooftop-Raumklimageräte bilden die Basis für die in Tabelle 11 vorgenommene Korrektur des Endenergieverbrauchs zur Berechnung der erneuerbaren Kälte.

Im Vergleich zu Tabelle 5 wird deutlich, dass die Anlagenkategorie der stationären Raumklimageräte (< 12 kW) hinsichtlich der zu erreichenden Mindesteffizienzen in Abhängigkeit von ihrer Nennkühlleistung und dem GWP des Kühlmittels weiter unterteilt werden muss. Diese Unterteilung wurde im Rahmen des Schätz-Modells berücksichtigt (vgl.

Tabelle 20). Die Angaben zur Verteilung der Anlagen sind auf eigene Annahmen zurückzuführen. Es wird davon ausgegangen, dass derzeit noch deutlich mehr Anlagen mit einem Kältemittel mit einem GWP > 150 in Betrieb sind. Aufgrund entsprechender Vorschriften zum Einsatz von Kältemitteln mit geringerem GWP wird sich die Verteilung perspektivisch verschieben.

Tabelle 20: Anlagenverteilung stationären Raumklimageräte (< 12 kW) in Abhängigkeit von ihrer Nennkühlleistung und dem GWP des Kühlmittels

	GWP > 150	GWP > 150	GWP ≤ 150	GWP ≤ 150
Leistungsklassen	< 6 kW	6-12 kW	< 6 kW	6-12 kW
Raumklimageräte (SEER)	40 %	40 %	10 %	10 %

Auf Basis der in Tabelle 19 aufgeführten Anlagenverteilung und den in Kapitel 3.5.1 hergeleiteten jahreszeitbedingten Primärleistungsfaktoren (zuzüglich Tabelle 18) kann die Effizienz des Anlagenbestandes in den jeweiligen Verbrauchssektoren abgeschätzt werden (vgl. Tabelle 21). Je nachdem, ob die mobilen Raumklimageräte und Rooftop-Raumklimageräte in die Berechnung der Effizienz des Anlagenbestandes einbezogen werden, ergibt sich der jahreszeitbedingte Primärleistungsfaktor aller Anlagen oder ein jahreszeitbedingter Primärleistungsfaktor, der lediglich Anlagen mit einem SPF_p oberhalb des Schwellenwertes von 1,4 berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Berechnung der jahreszeitbedingten Primärleistungsfaktoren des Anlagenbestandes innerhalb der Verbrauchssektoren sind in Tabelle 21 dargestellt. Unter Anwendung der in Kapitel 3.5.1 beschriebenen Formel zur Berechnung des erneuerbaren Anteils auf Basis der jahreszeitbedingten Primärleistungsfaktoren, kann der Anteil der erneuerbaren Energie in der Kälteversorgung der jeweiligen Verbrauchssektoren abgeschätzt werden. Hierbei ergeben sich keine Unterschiede zwischen den Betrachtungsjahren, da die Anlagenverteilung über die beiden Betrachtungsjahre als konstant angenommen wurde.

Tabelle 21: Jahreszeitbedingte Primärleistungsfaktoren und der sich daraus ergebende Anteil der erneuerbaren Energie für die Verbrauchssektoren

Verbrauchssektor	Betrach- tungsjahr	Jahreszeitbedingter Primärleistungsfaktor Gesamt	Jahreszeitbedingter Primärleistungsfaktor (SPF _p > 1,4)	Anteil der erneuerbaren Energie
Wohngebäude	2021	1,956	2,042	13,96 %
	2022	1,956	2,042	13,96 %
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	2021	1,779	1,926	11,44 %
	2022	1,779	1,926	11,44 %
Industrie	2021	1,793	1,927	11,45 %
	2022	1,793	1,927	11,45 %

Auf Basis des prozentualen Anteils erneuerbarer Energie und des witterungsabhängigen Kältebedarfs kann als letzter Schritt der Abschätzung die Menge der zur Kälteversorgung genutzten erneuerbaren Energie berechnet werden (vgl. Tabelle 22).

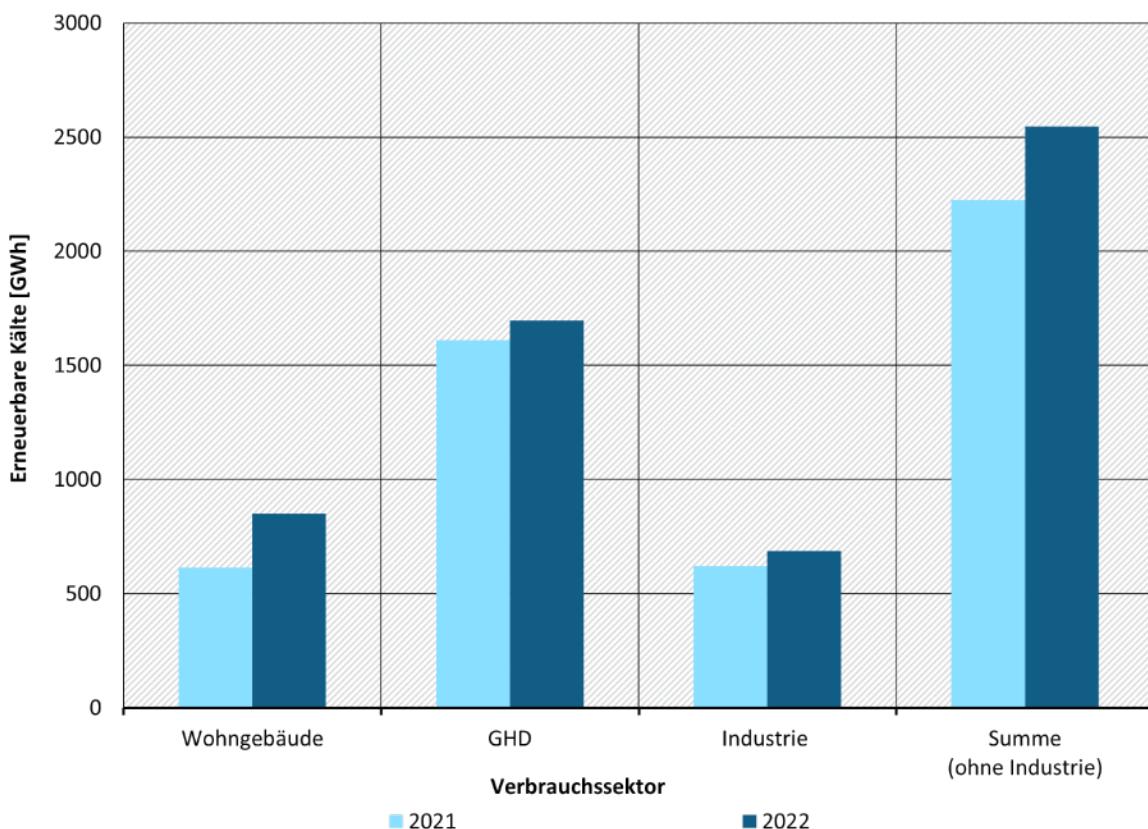
Tabelle 22: Berechnung der erneuerbaren Kälte für die Verbrauchssektoren

Verbrauchssektor	Betrach-tungsjahr	witterungsabhängiger Kältebedarf [GWh]	Anteil der erneuerbaren Energie	Erneuerbare Kälte [GWh]
Wohngebäude	2021	4.397	13,96 %	613
	2022	6.096	13,96 %	851
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	2021	14.066	11,44 %	1.609
	2022	14.827	11,44 %	1.696
Industrie	2021	5.514	11,45 %	631
	2022	6.084	11,45 %	697

4.2.2 Diskussion der Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Abschätzung der zur Kälteversorgung genutzten erneuerbaren Energie in der Raumklimatisierung diskutiert. In Abbildung 9 werden die Ergebnisse der Abschätzung zusammenfassend dargestellt. Die Summe der erneuerbaren Kälte in der Raumklimatisierung beinhaltet hierbei nicht die Abschätzungsergebnisse aus dem Verbrauchssektor Industrie, da diese nach aktuellem Erkenntnisstand nicht in die Datenmeldung an Eurostat aufgenommen wird.

Abbildung 9: Ergebnisse für die Abschätzung der erneuerbaren Kälte in den Verbrauchssektoren

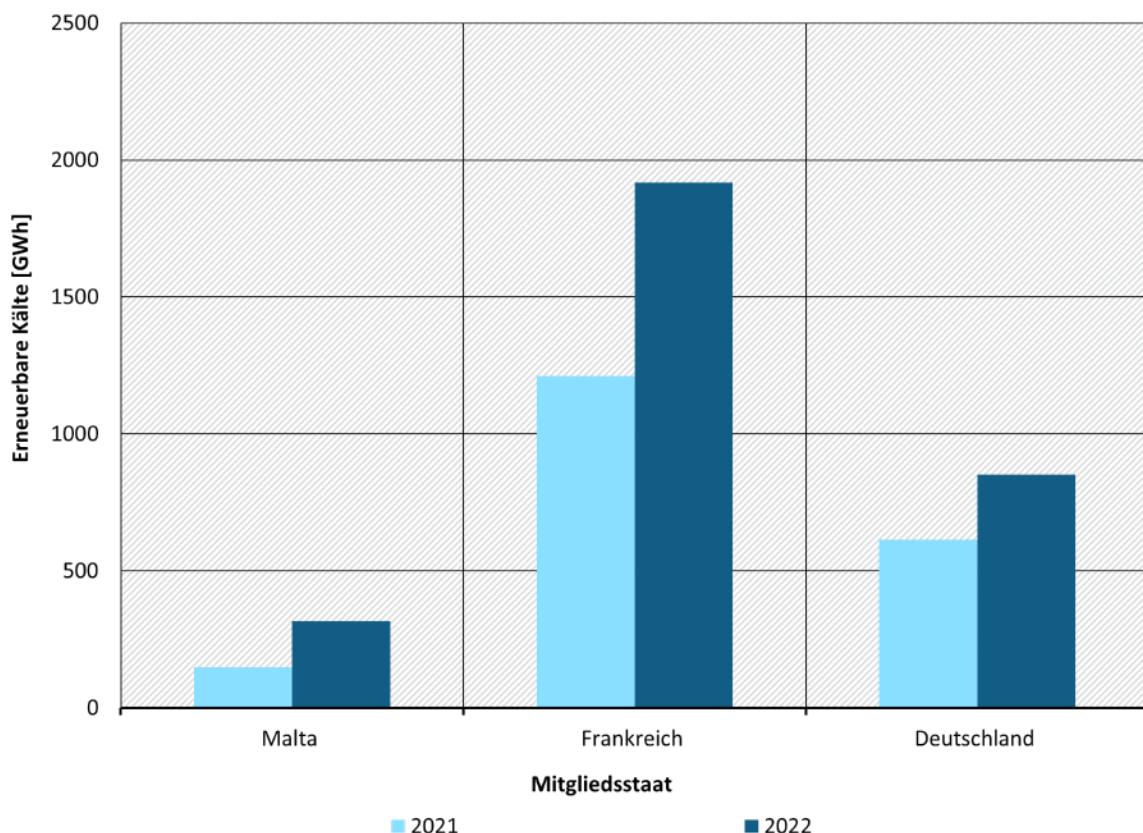


Quelle: [Eigene Darstellung auf Basis von Berechnungen des IE Leipzig]

Demnach ergibt sich im Verbrauchssektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen der höchste Wert für die erneuerbare Kälte. Bemerkenswert ist, dass der Trend zur Absenkung des Endenergieverbrauchs zwischen den Jahren 2021 und 2022 im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (vgl. Tabelle 10) sich nicht auf die Ergebnisse der Abschätzung übertragen hat. Dieser Umstand ist auf den überdurchschnittlich großen Wert für die Kühlgradtage im Betrachtungsjahr 2022 zurückzuführen.

Im nächsten Schritt werden die sektorenspezifischen Ergebnisse für die Verbrauchssektoren Wohngebäude und GHD mit den Datenmeldungen ausgewählter Mitgliedsstaaten verglichen. Die Auswahl der Mitgliedsstaaten deren Ergebnisse für einen Vergleich geeignet sind ist sehr limitiert, da viele Mitgliedsstaaten bisher keine Datenmeldung zur erneuerbaren Kälte vornehmen oder nur sehr geringe oder unfeasible Energiemengen melden. Für den in Abbildung 10 angestrebten Vergleich wird sich auf die Datenmeldungen der Länder Malta und Frankreich bezogen.

Abbildung 10: Erneuerbare Kälte in der Raumklimatisierung (Wohngebäude) ausgewählter Mitgliedsstaaten im Vergleich zum Abschätzungsergebnis



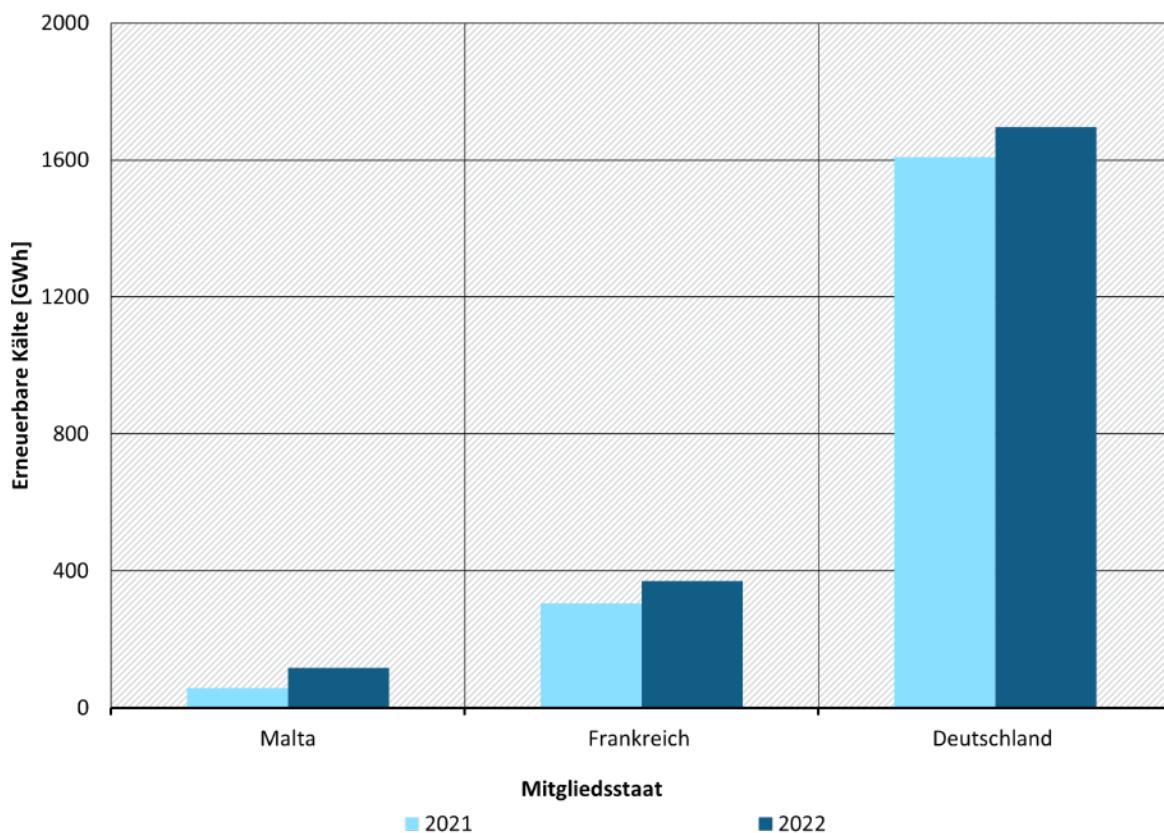
Quelle: [Eigene Darstellung auf Basis von Eurostat und Berechnungen des IE Leipzig]

In diesem Zusammenhang werden die Ergebnisse der Abschätzung für Deutschland als plausibel eingeschätzt. Wenngleich in Deutschland mehr private Haushalte als in Frankreich und wesentlich mehr als in Malta zu verzeichnen sind, ist der bestimmende Einflussfaktor für das Endergebnis hierbei die Anzahl der Kühlgradtage. Während in der vorliegenden Abschätzung für das Betrachtungsjahr 2022 in Deutschland von 278 Kühlgradtagen ausgegangen wird, meldet Frankreich 515 Kühlgradtage und Malta sogar 1.126. Dementsprechend ergeben sich in diesen Ländern auch wesentlich höhere äquivalente Vollaststunden für die Kälteerzeuger in der

Raumklimatisierung, wodurch der Kältebedarf pro Haushalt deutlich über den deutschen Verhältnissen liegt. Darüber hinaus meldet Malta eine wesentlich höhere Effizienz der Kälteerzeuger.

Im Hinblick auf eine vergleichende Betrachtung im Verbrauchssektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen zeigt sich ein heterogeneres Bild (vgl. Abbildung 11). Das Abschätzungsergebnis für Deutschland liegt hierbei weit über den Datenmeldungen der Mitgliedsstaaten. Insbesondere unter Berücksichtigung der in Abbildung 6 dargestellten Erhebung zum Endenergieverbrauch für die Kälteversorgung in Deutschland und Frankreich ist diese Diskrepanz nicht zu begründen. Unter der Voraussetzung, dass die Erhebung zum Endenergieverbrauch gemäß Pezutto et al. belastbar ist und Frankreich nicht nur Teilbereiche der Klimatisierung im GHD-Sektor berücksichtigt, können als mögliche Ursache für eine entsprechend große Diskrepanz lediglich die Ausgangswerte basierend auf den Anwendungsbilanzen benannt werden. Mit der bereits erwähnten Überarbeitung der Methodik seitens des Fraunhofer ISI hat sich der Endenergieverbrauch für die Klimatisierung im GHD-Sektor im Vergleich zu der vorherigen Zeitreihe mehr als verdoppelt. Inwiefern diese Entwicklung der Endenergieverbräuche plausibel ist kann nicht eingeschätzt werden.

Abbildung 11: Erneuerbare Kälte in der Raumklimatisierung des GHD-Sektors ausgewählter Mitgliedsstaaten im Vergleich zum Abschätzungsergebnis

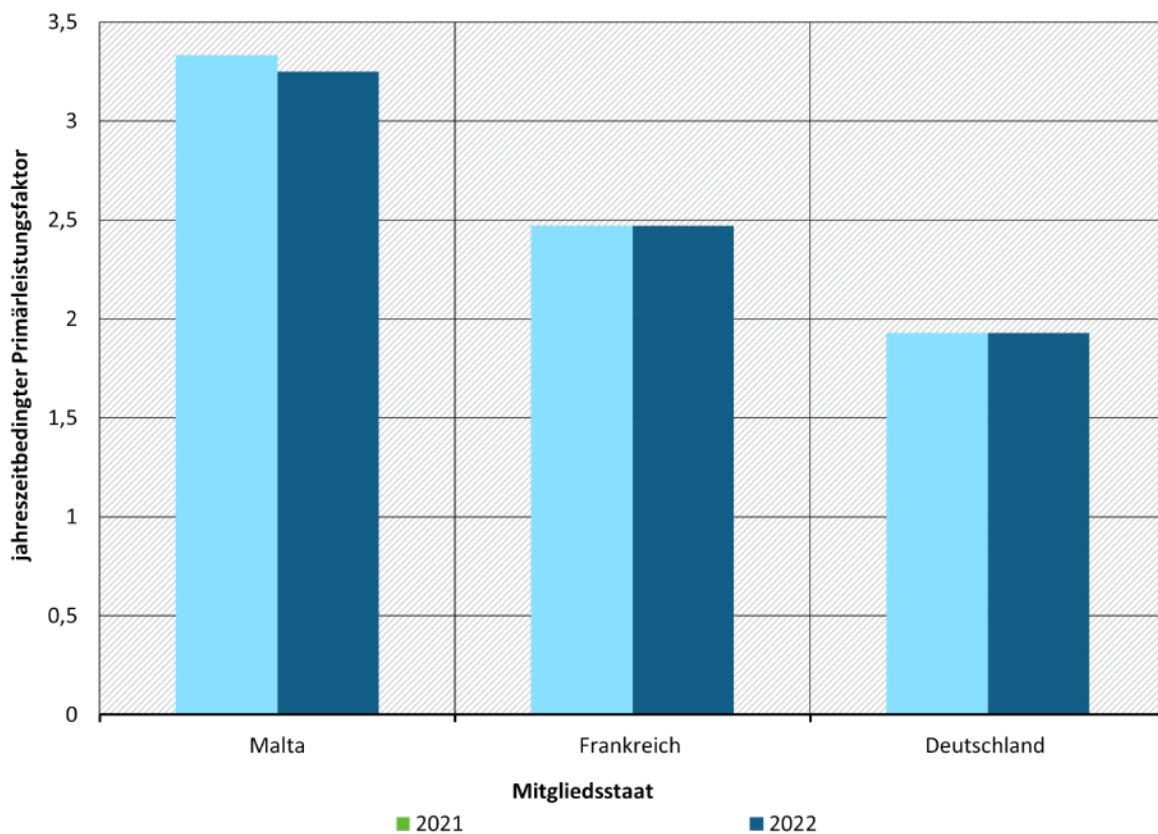


Quelle: [Eigene Darstellung auf Basis von Eurostat und Berechnungen des IE Leipzig]

Bezugnehmend auf die ungeklärte Diskrepanz des Abschätzergebnisses für die erneuerbare Kälte im GHD-Sektor wird nachfolgend in Abbildung 12 die Effizienz des Anlagenbestandes einer vergleichenden Betrachtung unterzogen. Hierbei wird deutlich, dass eine Überschätzung der Anlageneffizienz nicht für die in Abbildung 11 auftretenden Differenzen verantwortlich sein

kann. Es zeigt sich, dass Deutschland bei der Raumklimatisierung im GHD-Sektor im Vergleich die geringste Anlageneffizienz aufweist, was möglicherweise auf eine, unter Berücksichtigung der hohen Unsicherheiten, konservative Abschätzung schließen lässt.

Abbildung 12: Jahreszeitbedingte Primärleistungsfaktoren im GHD-Sektor ausgewählter Mitgliedsstaaten im Vergleich zum Abschätzungsergebnis



Quelle: [Eigene Darstellung auf Basis von Eurostat und Berechnungen des IE Leipzig]

Im Zuge der Bearbeitung wurden zudem die Ergebnisse für die Herleitung der installierten Nennkühlleistung (vgl. Tabelle 16) angezweifelt bzw. als zu hoch eingeschätzt. Eine Plausibilisierung der Anlageneffizienz auf Basis deutschlandspezifischer Studien war nicht möglich, weswegen die Berechnungsergebnisse wiederum in Relation zu den europaweiten Erhebungen durch Pezutto et al. gesetzt wurden. In dieser Studie werden die Anzahl und die durchschnittliche Leistung der Kälteerzeugungssysteme in Europa benannt. Auf Basis dieser Angaben konnte die installierte Nennkühlleistung, die den Rahmenbedingungen der Berechnungsvorschrift entspricht, für Europa berechnet werden. Werden die Ergebnisse dieser Hochrechnung ins Verhältnis gesetzt mit den Ergebnissen für die Nennkühlleistung in den jeweiligen Verbrauchssektoren gemäß des Schätzmodells so ergibt sich, dass etwa 14 % der Nennkühlleistung in Wohngebäuden innerhalb der EU auf Deutschland zurückzuführen ist. Im Hinblick auf den GHD-Sektor würde dieser Anteil bei 6 % liegen. Diese prozentuale Verteilung wird als realistisch eingeschätzt.

Weiterhin wurde eine Sensitivitätsanalyse für ausgewählte Eingangsparameter des Schätzmodells durchgeführt. Hierbei wurde der jeweilige Parameter in einer Spanne von -50 % bis 50 % jeweils in 5 % - Schritten abgesenkt oder erhöht und im Anschluss die prozentuale Veränderung des Ergebnisses analysiert. Bei der Sensitivitätsanalyse wurden der

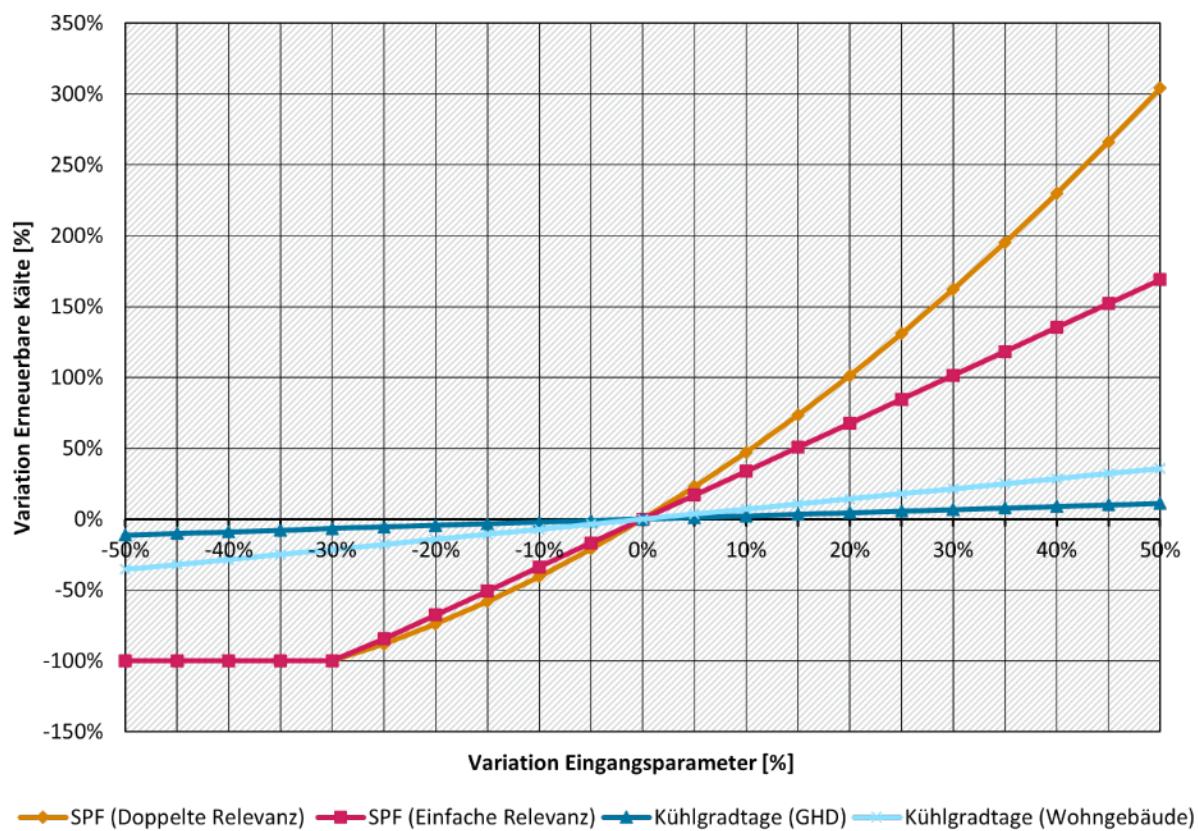
jahreszeitbedingte Primärleistungsfaktor und die Kühlgradtage betrachtet (vgl. Abbildung 13). Der orange Graph bezeichnet als „SPF (doppelte Relevanz)“ bildet den gegenwärtigen Einfluss der jahreszeitbedingten Primärleistungsfaktoren auf das Endergebnis ab. Doppelte Relevanz bedeutet hier, dass der jahreszeitbedingte Primärleistungsfaktor, basierend auf Anlageneffizienz und Anlagenverteilung, einerseits für die Bestimmung des als erneuerbar zu betrachtenden Anteils am Kältebedarf relevant ist und andererseits auch das Verhältnis von Endenergieverbrauch zu Kältebedarf bestimmt. In der Variante der „einfachen Relevanz“ wurde das Verhältnis zwischen Endenergieverbrauch und Kältebedarf festgesetzt und die Variation des jahreszeitbedingten Primärleistungsfaktors beeinflusste lediglich den als erneuerbar zu betrachtenden Anteil.

Es wird deutlich, dass das Ergebnis der Abschätzung in einem ganz erheblichen Ausmaß von dem Betrag des jahreszeitbedingten Primärleistungsfaktors abhängig ist. Diese Abhängigkeit wird aufgrund der „doppelten Relevanz“ noch verstärkt, so dass ein deutlich stärkerer Anstieg resultiert. Für den jahreszeitbedingten Primärleistungsfaktor mit „einfacher Relevanz“ ergibt sich ein linearer Verlauf. In beiden Fällen wird das Ergebnis der Abschätzung null, wenn der Eingangsparameter um 30 % oder mehr verringert wird. Hierfür verantwortlich ist wiederum der untere Schwellenwert gemäß Berechnungsvorschrift der Europäischen Kommission ($SPF_{p,Low} = 1,4$).

Bei der Sensitivitätsanalyse unter Einbezug der Kühlgradtage wird unterschieden zwischen Kühlgradtage im Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen und den Kühlgradtagen im Sektor Wohngebäude. Diese Unterscheidung wurde als relevant eingeschätzt, da zwar die Kühlgradtage in beiden Sektoren gleich sind, allerdings die Formeln für die Berechnung der äquivalenten Vollaststunden (vgl. Kapitel 3.5.1) sektorenspezifisch vorgegeben werden. Dementsprechend variiert die Anzahl der äquivalenten Vollaststunden je nach Sektor bei gleicher Anzahl an Kühlgradtagen.

Im Vergleich mit den Ergebnissen für die Sensitivitätsanalyse bei dem jahreszeitbedingten Primärleistungsfaktor wird deutlich, dass eine Variation der Kühlgradtage das Endergebnis in einem wesentlich geringeren Ausmaß beeinflusst. Gleichermassen wird bestätigt, dass der resultierende Kältebedarf im Sektor Wohngebäude stärker von den Witterungsverhältnissen abhängig ist, als das im Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen der Fall ist und somit auch ein größerer Einfluss auf das Ergebnis der Abschätzung entsteht.

Abbildung 13: Ergebnis der Sensitivitätsanalyse



Quelle: [Eigene Darstellung auf Basis von Berechnungen des IE Leipzig]

4.3 Fernkälteversorgung

Grundsätzlich gibt die Berechnungsvorschrift der Europäischen Kommission vor, dass die Berechnung der erneuerbaren Energie in der Fernkälteversorgung lediglich auf Basis von Messwerten durchzuführen ist (vgl. Kapitel 3.5.3). Alternativ könnte an dieser Stelle perspektivisch auf die Datenbank „District Energy Systems“ des AGFW e.V. zurückgegriffen werden. Gemäß FFVAV (Fernwärme- oder Fernkälte-Verbrauchserfassungs- und Abrechnungsverordnung) § 5 (1) 7 sind die Betreiber von Fernkältenetzen bereits dazu verpflichtet, den Anteil erneuerbarer Energie zu melden. Diese Datenmeldung wird durch den AGFW betreut und folgt der Berechnungsvorschrift nach Anhang VII der RED II. Bis zum Zeitpunkt des Redaktionsschlusses lagen innerhalb der Datenbank jedoch nur Betrachtungen zu vereinzelten Fernkältenetzen vor. Es wird empfohlen, die Entwicklung der Datenbank zu beobachten und perspektivisch gegebenenfalls in Kooperation mit dem AGFW e.V. eine Methodik zur Berechnung der erneuerbaren Energie in der Kälteversorgung mittels Fernkältenetzen auf Basis der Datenbank zu erarbeiten. Da jedoch gegenwärtig noch keine umfassendere Betrachtung der erneuerbaren Energie in der Fernkälteversorgung vorliegt, wurde im Zuge des Projekts eine Methodik für eine näherungsweise Berechnung entwickelt, die nachfolgend erläutert wird. Die Bedeutung der Fernkälteversorgung im Hinblick auf die für die Kälteversorgung genutzten erneuerbaren Energie ist nach gegenwärtigem Stand als gering einzuschätzen, da bisher wenig Fernkältenetze in den relevanten Verbrauchssektoren in Deutschland betrieben werden.

4.3.1 Methodik

Ausgangspunkt für die entwickelte Methodik sind die Erhebungen des AGFW e.V. zu den Fernkältenetzen in Deutschland. Eine zusammenfassende Darstellung der relevantesten Informationen aus dem AGFW Hauptbericht 2022 erfolgt in Tabelle 23.

Tabelle 23: Fernkältenetze in Deutschland (AGFW 2023)

Bundesland	Anzahl Kältenetze	Länge der Kältenetze [km]	angeschlossenen Leistung [MW]	Anzahl KKM	Anzahl SKM	nutzbare Kälteabgabe [GWh]
Baden-Württemberg	4	16,5	40,9	11	-	31
Bayern	7	38,0	48,3	3	1	62
Berlin	1	12,0	66,8	11	2	45
Hessen	1	1,5	10,0	1	-	7
Niedersachsen	1	k.A.	1,3	2	-	2
Nordrhein-Westfalen	4	6,2	13,7	10	7	31
Rheinland-Pfalz	1	0,2	2,0	2	1	1
Sachsen	9	9,3	29,8	13	7	25
Sachsen-Anhalt	1	1,0	2,0	1	2	3
Thüringen	1	0,8	2,1	2	1	4
Summe	30	85,5	216,9	56	21	211

Für die weiteren Betrachtungen zur Berechnung der erneuerbaren Energie wird die nutzbare Kälteabgabe als Ausgangsgröße betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass die nutzbare Kälteabgabe gleichzusetzen ist mit der Nettokälteversorgung in Fernkältenetzen gemäß Anhang VII. Da dem Hauptbericht des AGFW e.V. nicht entnommen werden kann, ob die Sorptionskältemaschinen mit erneuerbarer Wärme oder mit fossilen Energieträgern betrieben werden, erfolgt die näherungsweise Aufteilung der nutzbaren Kälteabgabe in Abhängigkeit von der eingesetzten Technologie. Für das weitere Vorgehen ist daher nur die nutzbare Kälteabgabe von Kompressionskältemaschinen von Bedeutung.

Für die näherungsweise Aufteilung der nutzbaren Kälteabgabe wurde jeweils bundeslandscharf die Anzahl von Kompressions- und Sorptionskältemaschinen mit der nutzbaren Kälteabgabe ins Verhältnis gesetzt. Da die Daten des AGFW e.V. in Abhängigkeit von dem Teilnehmendenkreis der Erhebung stark schwanken können, wurde diese Betrachtung für die Hauptberichte aus den Jahren 2019 bis 2022 durchgeführt. Hierbei ergab sich eine Bandbreite des Anteils der durch Kompressionskältemaschinen bereitgestellten nutzbaren Kälteabgabe von 60,4 % bis 77,4 %. Im Anschluss wurde der Mittelwert von 72 % für die nachfolgende Betrachtung als konstant angenommen wird.

Ein weiterer Korrekturfaktor ergibt sich aufgrund der Untererfassung des AGFW e.V. im Hinblick auf die leitungsgebundene Kälteversorgung. Im Zuge der Fachinterviews wurde die Angabe gemacht, dass der AGFW e.V. etwa zwei Drittel der Wärmenetze in Deutschland erfasst. Diese Aussage wurde im Zuge des Abstimmungsprozesses auf die Fernkälteversorgung

übertragen. Tendenziell kann davon ausgegangen werden, dass die Untererfassung noch gravierender ausfällt, da typische Anwendungsbereiche der Fernkälteversorgung (z.B. Kältenetze innerhalb eines Universitätsgeländes) in der Regel nicht Gegenstand des Hauptberichtes sind. Somit ergeben sich für die Betrachtungsjahre 2021 und 2022 die in Tabelle 24 aufgeführten Ausgangswerte.

Tabelle 24: Berechnungsergebnisse der Vorbetrachtungen zur leitungsgebundenen Nettokälteversorgung mittels Kompressionskältemaschinen in Deutschland

Betrachtungsjahr	nutzbare Kälteabgabe gemäß AGFW Hauptbericht [GWh]	Faktor zur Abbildung der Untererfassung des AGFW	Anteil der durch KKM bereitgestellten Kälteversorgung	Nettokälteversorgung durch KKM in Deutschland [GWh]
2021	251,0	66,7 %	72,0 %	241,0
2022	212,0	66,7 %	72,0 %	203,5

Im Hinblick auf die Anlageneffizienzen der Kompressionskältemaschinen wird die Annahme getroffen, dass innerhalb der Fernkältenetze keine Kälteerzeuger zum Einsatz kommen, die den unteren Schwellenwert der Berechnungsvorschrift ($SPF_p < 1,4$) unterschreiten.

Für die Abschätzung der tatsächlichen Anlageneffizienz konnten im Zuge der Literaturrecherche keine Erhebungen zu den Fernkältenetzen innerhalb Deutschlands identifiziert werden. Aus diesem Grund wird sich nachfolgend auf europaweite Betrachtungen bezogen. In der Publikation „Recent Advances in District Cooling Diffusion in the EU27+UK: An Assessment of the Market“ (Pezutto et al. 2022) werden Angaben zu der Arbeitszahl im Kühlbetrieb (SEER) von Kälteerzeuger in Fernkältenetzen in Abhängigkeit von den klimatischen Bedingungen der jeweiligen europäischen Länder gemacht (vgl. Tabelle 25).

Tabelle 25: Arbeitszahl im Kühlbetrieb (SEER) von Kälteerzeugern europäischer Fernkältenetze in Abhängigkeit von den klimatischen Bedingungen (Pezutto et al. 2022)

Klimazone	Beispieleländer	SEER	SPF _p (eigene Berechnung)
Gemäßigt	Deutschland, Belgien, Österreich	5,1	2,43
Warm	Italien, Griechenland, Spanien	4,0	1,91
Kalt	Dänemark, Finnland, Irland	9,4	4,48

Für die weiteren Betrachtungen folgt somit ein jahreszeitbedingter Primärleistungsfaktor (SPF_p) von 2,43. Unter Anwendung der Formel zur Berechnung des Anteils erneuerbarer Energie in der Kälteversorgung (vgl. Kapitel 3.5.1) ergibt sich ein Anteil von 22,4 %, der als erneuerbar betrachtet werden kann und im Anschluss auf die berechnete Nettokälteversorgung angewandt wird (vgl. Tabelle 26).

Bezüglich der thermischen Verluste innerhalb der Fernkältenetze konnten ebenfalls keine Erhebungen im deutschsprachigen Raum identifiziert werden. Es wurde daher davon ausgegangen, dass die entsprechenden Verluste in Deutschland auf einem vergleichbaren Niveau liegen wie in anderen Mitgliedsstaaten. Bei der Analyse der vergangenen Datenmeldungen über das SHARES-Tool wurde deutlich, dass lediglich Italien eine Differenz zwischen Netto- und Bruttokälteversorgung in Fernkältenetzen gemeldet hat. Die thermischen Verluste beliefen sich hierbei auf 8,2 %. Diese werden auf die Nettokälteversorgung durch Kompressionskältemaschinen (vgl. Tabelle 24) angewandt, um eine Abschätzung zur

Bruttokälteversorgung zu ermöglichen. Die Endergebnisse der Betrachtungen zur Abschätzung der in der Fernkälteversorgung genutzten erneuerbaren Energie werden in Tabelle 26 dargestellt und stehen im Einklang mit der für die Datenmeldung im SHARES-Tool erforderlichen Ergebnisstruktur.

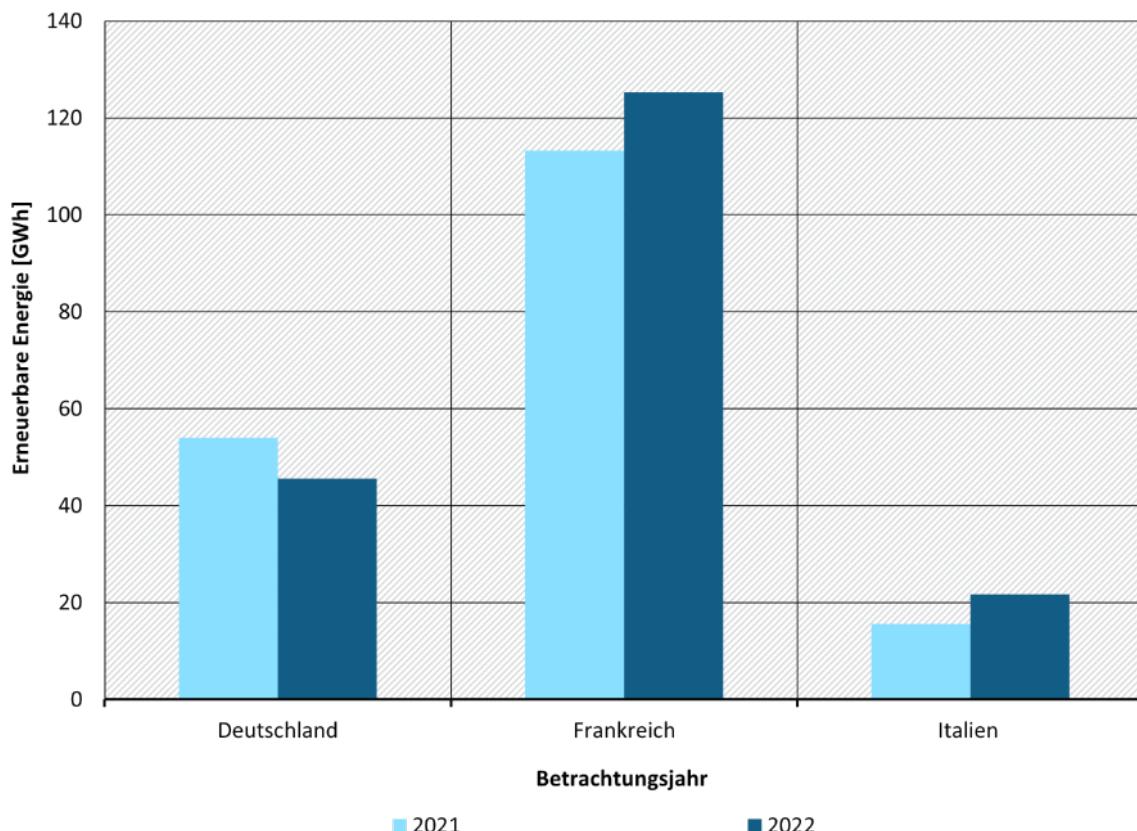
Tabelle 26: Berechnungsergebnisse für die Betrachtung der erneuerbaren Energie in der Fernkälteversorgung

Betrachtungsjahr	Nettokälteversorgung (nur KKM) [GWh]	Thermische Verluste	Bruttokälteversorgung (nur KKM) [GWh]	SPF _P	Anteil erneuerbarer Energie	Erneuerbare Kälte [GWh]
2021	241,0	8,2 %	262,5	2,43	22,4 %	54,0
2022	203,5	8,2 %	221,7	2,43	22,4 %	45,6

4.3.2 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Berechnung für Deutschland im Vergleich zu den bisherigen Datenmeldungen der Mitgliedsstaaten werden in Abbildung 14 dargestellt. Bisher haben lediglich Italien und Frankreich Datenmeldungen im Sektor „District Cooling“ vorgenommen.

Abbildung 14: Erneuerbare Kälte in der Fernkälteversorgung ausgewählter Mitgliedsstaaten im Vergleich zum Abschätzungsergebnis



Quelle: [Eigene Darstellung auf Basis von Eurostat und Berechnungen des IE Leipzig]

Die Berechnungsergebnisse und insbesondere das Verhältnis der erneuerbaren Energie in der Fernkälteversorgung der einzelnen Länder zueinander wird als realistisch eingeschätzt. Dies bestätigt ein Abgleich der Berechnungsergebnisse mit den Abschätzungen zur nutzbaren Kälteabgabe aus der Studie „*Recent Advances in District Cooling Diffusion in the EU27+UK: An Assessment of the Market*“ (Pezutto et al. 2022) für das Betrachtungsjahr 2016, die in Tabelle 27 aufgeführt werden.

Tabelle 27: Nutzbare Kälteabgabe ausgewählter Mitgliedsstaaten in der Fernkälteversorgung für das Betrachtungsjahr 2016 (Pezutto et al. 2022)

Vergleichsgröße	Deutschland	Frankreich	Italien
Nutzbare Kälteabgabe [GWh]	310	1060	130

Bei dem Vergleich der Berechnungsergebnisse zwischen den Betrachtungsjahren 2021 und 2022 wird deutlich, dass die erneuerbare Energie in der Fernkälteversorgung in Deutschland zwischen den Jahren gesunken ist, während Italien und Frankreich einen Anstieg verzeichnet haben. Diese Entwicklung für Deutschland ist maßgeblich auf die Schwankungen in der nutzbaren Kälteabgabe gemäß dem AGFW Hauptberichtes zurückzuführen, welche auf kontinuierliche Veränderungen im Teilnehmendenkreis zurückgehen und steht in keinem Zusammenhang zur tatsächlichen Entwicklung der Fernkälteversorgung.

Abschließend erfolgt die vergleichende Betrachtung der in den Mitgliedsstaaten angegebenen jahreszeitbedingten Primärleistungsfaktoren (SPF_p). Hierbei wird ersichtlich, dass die angenommene Anlageneffizienz für Deutschland höher ausfällt als in den Mitgliedsstaaten. Die Annahmen diesbezüglich sind diskutabel. Der Umstand, dass die Anlageneffizienz in Ländern mit höheren Durchschnittstemperaturen geringer ausfällt, ist jedoch im Einklang mit den in Tabelle 25 dargestellten Betrachtungen.

Tabelle 28: Jahreszeitbedingte Primärleistungsfaktoren ausgewählter Mitgliedsstaaten in der Fernkälteversorgung für das Betrachtungsjahr 2021 (Pezutto et al. 2022)

Vergleichsgröße	Deutschland	Frankreich	Italien
Jahreszeitbedingter Primärleistungsfaktor (SPF_p)	2,43	1,95	2,20

5 Fazit für Deutschland

Bei der Analyse der Berechnungsvorschrift zur Abbildung der in der Kälteversorgung genutzten erneuerbaren Energie wurde zunächst festgestellt, dass die Berechnungsmethode aufwändiger ist als in anderen Bereichen der Energiestatistik für erneuerbare Energieträger. Dies führt zu einem nicht unerheblichen Aufwand bei der Berücksichtigung der erneuerbaren Kälte in der internationalen Berichterstattung im Rahmen der Energie- und Klimaschutzpläne, während die zu meldenden Energiemengen in Relation zur anderen Energieträgern vergleichsweise gering ausfallen und somit nur marginal zum Erreichen der Ziele beitragen können.

Im Hinblick auf die nationale Umsetzbarkeit der Berechnungsvorschrift der Europäischen Kommission ergeben sich vielfältige Problemstellungen, da ein Großteil der notwendigen Input-Daten nicht flächendeckend erfasst wird. Für eine präzise Bestimmung des Anteils erneuerbarer Energie auf Basis von Standardwerten ist eine umfassende Erhebung zu der installierten Nennkühlleistung in Deutschland erforderlich. Des Weiteren verdeutlicht die starke Abhängigkeit des Ergebnisses der Abschätzung von den Effizienzparametern, dass in Deutschland eine Erhebung zu Art und Anzahl der Kälteversorgungssysteme notwendig ist.

Die Datengrundlage für die Betrachtung der Fernkälteversorgung muss ebenfalls perspektivisch ausgebaut werden. Die Datenanalyse auf Basis der AGFW Hauptberichte ergeben aufgrund des stark variierenden Kreises der befragten Unternehmen keine konsistenten Ergebnisse über mehrere Betrachtungsjahre. Alternativ könnte die Erfassung der Fernkälteversorgung im Rahmen des Energiestatistikgesetzes angestrebt werden.

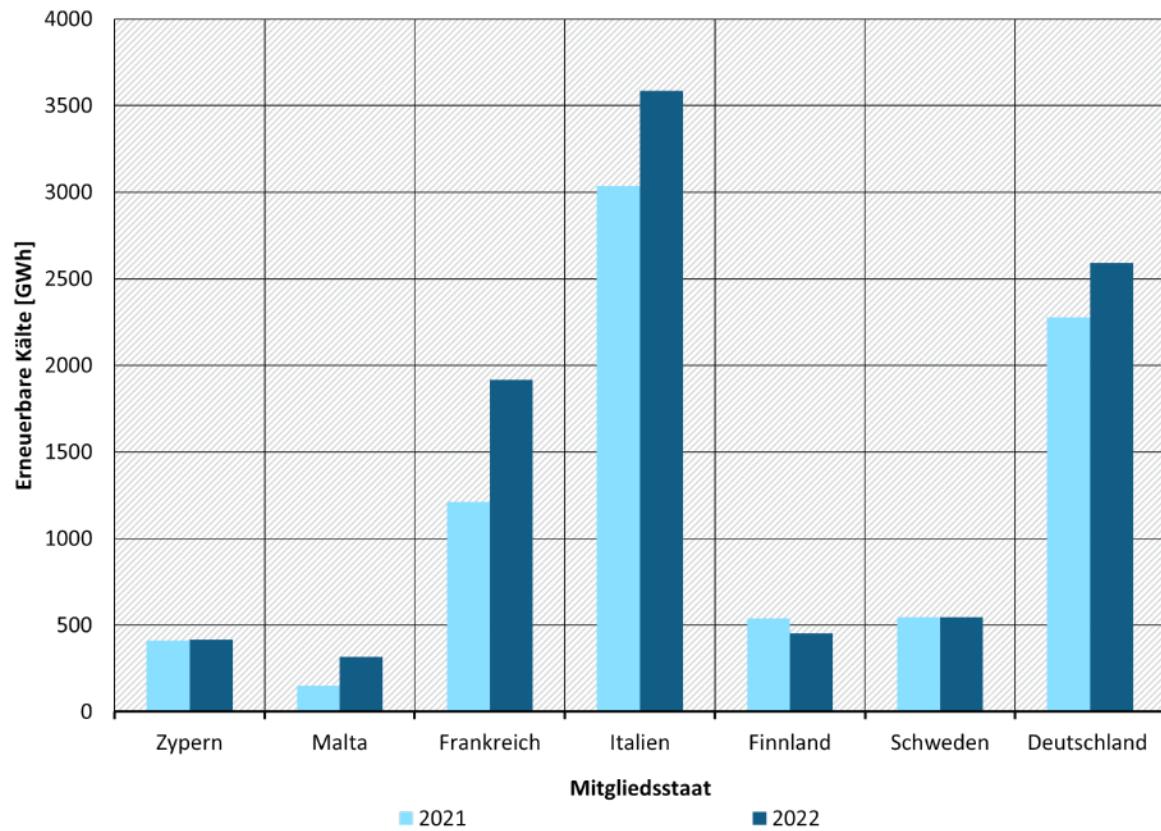
Die Berücksichtigung von Kälteerzeugern mit einer Nennkühlleistung von mehr als 1,5 MW ist ebenfalls nur möglich, wenn auf Bundesebene gesetzliche Regelungen zur Erfassung der notwendigen Messdaten (Energiezufuhr und bereitgestellte Kühlenergie) etabliert werden.

Trotz der identifizierten Probleme und der unzureichenden Datenbasis wurde ein Schätz-Modell entwickelt, das die Herangehensweise auf Basis von Standardwerten für die Raumklimatisierung in Wohngebäuden, im GHD-Sektor und in der Industrie abbildet. Ergänzend wurde zudem eine Abschätzung der erneuerbaren Kälte in der Fernkälteversorgung vorgenommen. Bei der Entwicklung des Schätz-Modells mussten aufgrund der lückenhaften Datengrundlage vielfach Annahmen getroffen werden, die im Zuge von Fachinterviews mit Forschenden validiert wurden.

Bei der Abschätzung der erneuerbaren Kälte in der Raumklimatisierung wurden die Endenergieverbräuche der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen als Ausgangsgröße gewählt. Während die Anwendungsbilanzen jährlich fortgeschrieben werden, liegen die zugrundeliegenden Haushalts- und Unternehmensbefragungen schon einige Jahre zurück. Durch eine Neuauflage dieser Befragungen könnte die Qualität der Anwendungsbilanzen und somit auch die Qualität der Abschätzung der erneuerbaren Kälte verbessert werden. Darüber hinaus könnten neuartige Entwicklungen, wie z.B. die Kälteversorgung durch Wärmepumpen im Umkehrbetrieb, besser berücksichtigt werden.

Abschließend wird in Abbildung 15 das Ergebnis der Abschätzung im Vergleich zu anderen europäischen Mitgliedsstaaten dargestellt. Die Summe der erneuerbaren Kälte für Deutschland beinhaltet hierbei lediglich die Raumklimatisierung in Wohngebäuden und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen sowie die Fernkälteversorgung.

Abbildung 15: Vergleich des Abschätzungsergebnisses mit der Datenmeldung zur erneuerbaren Kälte von anderen Mitgliedsstaaten



Quelle: [Eigene Darstellung auf Basis von Eurostat und Berechnungen des IE Leipzig]

6 Quellenverzeichnis

AG Energiebilanzen e.V. (2019): Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland. Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken. Detaillierte Anwendungsbilanzen der Endenergiesektoren für 2017 und 2018 sowie zusammenfassende Zeitreihen zum Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken für Jahre von 2008 bis 2018. Berlin.

AG Energiebilanzen e.V. (2023): Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland. Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken. Detaillierte Anwendungsbilanzen der Endenergiesektoren für 2017 und 2018 sowie zusammenfassende Zeitreihen zum Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken für Jahre von 2012 bis 2022. Berlin. Online verfügbar unter: https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2023/01/AGEB_22p2_rev-1.pdf (04.11.2024)

Climate Change Knowledge Portal (2023): Observed Annual Average Mean Surface Air Temperature, 1901-2022. Online verfügbar unter: <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/#country-map> (zuletzt geprüft am 10.06.2024)

Deutscher Wetterdienst (2024): Messdaten für Kühlgradstunden. Online verfügbar unter: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/derived_germany/techn/monthly/heating_degreedays/hdd_3807/ (zuletzt geprüft am 20.06.2024)

AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V. (2023): Hauptbericht 2022. Frankfurt am Main.

Elnagar, E., Pezutto, S., Duplessis, B., Fontenaille, T., Lemort, V. (2023): A comprehensive scouting of space cooling technologies in Europe: Key characteristics and development trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113636>

Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Neufassung) (Text von Bedeutung für den EWR.). (2018). Official Journal, L 328, 82-209. ELI: <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj>

Richtlinie 2012/27/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz, zur Änderung der Richtlinien 2009/125/EG und 2010/30/EU und zur Aufhebung der Richtlinien 2004/8/EG und 2006/32/EG Text von Bedeutung für den EWR. (2012). Official Journal, L 315, 1-56. ELI: <http://data.europa.eu/eli/dir/2012/27/oj>

Delegierte Verordnung (EU) 2022/759 der Kommission vom 14. Dezember 2021 zur Änderung des Anhangs VII der Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich einer Methode zur Berechnung der Menge der für die Kälteversorgung und die Fernkälteversorgung genutzten erneuerbaren Energie. (2022). Official Journal, L 139, 1-12. ELI: http://data.europa.eu/eli/reg_del/2022/759/oi

Verordnung (EU) Nr. 206/2012 der Kommission vom 6. März 2012 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Raumklimageräten und Komfortventilatoren (Text von Bedeutung für den EWR). (2017).

Verordnung (EU) 2016/2281 der Kommission vom 30. November 2016 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte im Hinblick auf Luftheizungsprodukte, Kühlungsprodukte, Prozesskühler mit hoher Betriebstemperatur und Gebläsekonvektoren (Text von Bedeutung für den EWR). (2016). Official Journal, L 346, 1-50. ELI: <http://data.europa.eu/eli/reg/2016/2281/oi>

Frondel, M., Janßen-Timmen, R. (2022): Erstellung der Anwendungsbilanzen 2021 für den Sektor der Privaten Haushalte und den Verkehrssektor in Deutschland. Essen. Online verfügbar unter: <https://ag-energiebilanzen.de/>

energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2024/01/AGEB-AnwBil-2022-priv.-HH-und-Verkehr_vorl._EB-09-2023.pdf (zuletzt geprüft am 04.11.2024)

Goetschkes, C., Schmidt, D., Rogotzki, R., Kanngießer, A. (2021): Kältetechnik in Deutschland – Metastudie Kältebedarf Deutschland. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT. Oberhausen. Online verfügbar unter: <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/f359e3e9-97e3-44ba-a60a-f8dfff8e5716> (zuletzt geprüft am 04.11.2024)

Heinrich, C., Wittig, S., Albring, P., Richter, L., Safraik, M., Böhm, U., Hantsch, A. (2014): Nachhaltige Kälteversorgung in Deutschland an den Beispielen Gebäudeklimatisierung und Industrie. Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden gGmbH. Dresden. Online verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_25_2014_nachhaltige_kaelteversorgung_in_deutschland_1.pdf (zuletzt geprüft am 04.11.2024)

Kemmler, A., Kirchner, A., Auf der Maur, A., Ess, F., Kreidelmeyer, S., Piegza, A., Spillmann, T., Straßburg, S., Wünsch, M., Ziegenhagen, I. (2020): Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050. Basel. Online verfügbar unter: <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccx/2021/energiewirtschaftliche-projektionen-und-folgeabschaetzungen-2030-2050.pdf> (zuletzt geprüft am 04.11.2024)

European Commission: Joint Research Centre, Kavvadias, K., Carlsson, J., & Lyons, L. (2021). Defining and accounting for waste heat and cold, Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/73253>

Paschotta, R. (2016): Energy Efficiency Ratio https://www.energie-lexikon.info/energy_efficiency_ratio.html (15.03.2023)

Preuß, G. (2019): Energiebedarf für Kältetechnik in Deutschland. Forschungsrat Kältetechnik e.V. Online verfügbar unter: https://www.fuchs.com/fileadmin/schmierstoffe/Produkte/Lieferprogramm/Industrieschmierstoffe/Kaeltemaschinenoele/Energiebedarf_fuer_Kaeltetechnik_in_Deutschland_Herausgeber_Forschungsrat_Kaeltetechnik_e.V._im_VDMA.pdf (zuletzt geprüft am 05.11.2024)

Pezzutto, S.; Riviere, P.; Kranzl, L.; Zambito, A.; Quaglini, G.; Novelli, A.; Hummel, M.; Bottecchia, L.; Wilczynski, E. (2022) Recent Advances in District Cooling Diffusion in the EU27+UK: An Assessment of the Market. Sustainability, 14, 4128. <https://doi.org/10.3390/su14074128>

European Commission: Directorate-General for Energy, Pezzutto, S., Novelli, A., Zambito, A., Quaglini, G., Miraglio, P., Belleri, A., Bottecchia, L., Gantioler, S., Moser, D., Riviere, P., Etienne, A., Stabat, P., Berthou, T., Kranzl, L., Mascherbauer, P., Fallahnejad, M., Viegand, J., Jensen, C., ... Müller, A. (2022). *Cooling technologies overview and market shares. Part 1 of the study “Renewable cooling under the revised Renewable Energy Directive ENER/C1/2018-493”*, Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2833/799633>

Rohde, C.; Arnold-Keifer, S. (2022): Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2021 bis 2023 für die Sektoren Industrie und GHD. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe. Online verfügbar unter: https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2024/01/Anwendungsbilanz_Industrie_2022_vorlaeufig-update_20231030.pdf (zuletzt geprüft am 04.11.2024)

Schmidt, D., Goetschkes, C., Pollerberg, C. (2020): Kältetechnik in Deutschland – Steckbriefe zu Kältetechnologien, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Oberhausen. Online verfügbar unter: <https://www.umsicht.fraunhofer.de/content/dam/umsicht/de/dokumente/referenzen/flexkaelte/K%C3%A4ltetechnologien.pdf> (zuletzt geprüft am 04.11.2024)

Statistisches Amt der Europäischen Union (2024): Kurzbewertung der erneuerbaren Energiequellen (Short Assessment of Renewable Energy Sources – SHARES). Online verfügbar unter:
[https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/database/additional-data#Short%20assessment%20of%20renewable%20energy%20sources%20\(SHARES\)](https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/database/additional-data#Short%20assessment%20of%20renewable%20energy%20sources%20(SHARES)) (zuletzt geprüft am 16.07.2024)

Steinbach, J., Popovski, E., Christ, C., Ortner, S., Fritz, M., Langreder, N., Heinrich, J. (2021): Umfassende Bewertung des Potenzials für eine effiziente Wärme- und Kältenutzung für Deutschland. IRRES- Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien GmbH, Karlsruhe. Online verfügbar unter: https://irees.de/wp-content/uploads/2021/03/Comprehensive-Assessment-Heating-and-Cooling_Germany_2020.pdf (zuletzt geprüft am 04.11.2024)