

TEXTE

82/2022

Zwischenbericht

Hauswärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln

Entwicklung von Anforderungen an klimafreundliche und energieeffiziente Geräte für den Blauen Engel

von:

Claudia Becker, Johanna Gloël, Jascha Moie, Edgar Timm
HEAT GmbH, Königstein

Patrick Huth, Florian Koch, Christine Lützkendorf
Deutsche Umwelthilfe (DUH), Berlin

Herausgeber:
Umweltbundesamt

TEXTE 82/2022

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und
Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3720 37 301 0
FB000820

Zwischenbericht

Hauswärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln

Entwicklung von Anforderungen an klimafreundliche und
energieeffiziente Geräte für den Blauen Engel

von

Claudia Becker, Johanna Gloël, Jascha Moie, Edgar Timm
HEAT GmbH, Königstein

Patrick Huth, Florian Koch, Christine Lützkendorf
Deutsche Umwelthilfe (DUH), Berlin

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

 [/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

HEAT GmbH
Seilerbahnweg 14
61462 Königstein im Taunus

Abschlussdatum:

November 2021

Redaktion:

Fachgebiet III 1.4 Stoffbezogene Produktfragen
Dr. Diana Thalheim

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, August 2022

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

Kurzbeschreibung: Hauswärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln

Hauswärmepumpen, also solche Wärmepumpen, die in Ein- oder Mehrfamilienhäusern zur Beheizung der Räume oder auch gleichzeitig der Warmwasserbereitung dienen, kommt bei der Erreichung der Klimaziele für den Gebäudebereich eine tragende Rolle zu. Sie können maßgeblich zur Dekarbonisierung beitragen, da sie mit Strom betrieben werden, der zunehmend aus regenerativen Quellen gewonnen wird. Eine hohe Energieeffizienz dieser Produkte ist beim prognostizierten Anstieg der Stückzahlen trotzdem besonders wichtig, damit das Stromnetz nicht unnötig belastet wird und natürlich auch, um nicht unnötig viel Strom zu verbrauchen, solange dieser nicht vollständig aus regenerativen Quellen erzeugt wird. Darüber hinaus werden in den meisten Wärmepumpen noch fluoridierte Kältemittel eingesetzt, die aufgrund ihres Treibhauspotenzials und ihrer atmosphärischen Abbauprodukte vermieden werden sollten. Das Umweltbundesamt beabsichtigt daher eine Neuauflage eines Umweltzeichens Blauer Engel für Hauswärmepumpen. Die Nutzung von natürlichen Kältemitteln steht als Kriterium bereits fest; weitere Kriterien werden im Rahmen des Projekts „Hauswärmepumpen mit natürlichem Kältemittel – Entwicklung von Anforderungen an klimafreundliche und energieeffiziente Geräte für den Blauen Engel“ erarbeitet.

Dieser Zwischenbericht stellt die Grundlage für die Entwicklung von konkreten Kriterienvorschlägen für einen zukünftigen Blauen Engel für die Produktgruppe Hauswärmepumpen dar. Hierfür wurde die aktuelle Marktsituation und der Stand der Technik mit Blick auf die Marktdurchdringung mit natürlichen Kältemitteln untersucht. Außerdem beleuchtet der Bericht weitere Umweltwirkungen von Wärmepumpen, die beispielsweise mit den verwendeten Materialien und den Geräuschemissionen zusammenhängen.

Abstract: Domestic heat pumps with natural refrigerants

Domestic heat pumps have a key role to play in achieving the climate targets for the building sector. They can contribute significantly to decarbonisation, as they are operated with electricity that is increasingly generated from renewable sources. A high energy efficiency of these products is nevertheless particularly important with the predicted increase of numbers, so that 1) the electricity grid is not unnecessarily burdened and, of course, 2) so that not too much electricity is consumed while is not generated entirely from renewable sources yet. In addition, most heat pumps still use fluorinated refrigerants, which should be avoided due to their global warming potential and atmospheric degradation products. The German Environment Agency therefore intends to reissue a Blue Angel eco-label for domestic heat pumps. The use of natural refrigerants has already been established as a criterion; further criteria are being developed as part of the project "Domestic heat pumps with natural refrigerants - development of requirements for climate-friendly and energy-efficient appliances for the Blue Angel".

This interim report provides the basis for the development of concrete criteria proposals for a future Blue Angel for the product group of domestic heat pumps. It examines the current market situation and the state of the art with regard to the penetration of the market with natural refrigerants. In addition, the report sheds light on other environmental impacts of heat pumps, for example related to the materials used and noise emissions.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	6
Abbildungsverzeichnis.....	9
Tabellenverzeichnis	11
Abkürzungsverzeichnis	13
Zusammenfassung.....	17
Summary	26
1 Die Produktgruppe: Hauswärmepumpen	35
1.1 Kategorisierung von Hauswärmepumpen	35
1.2 Hauswärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln	36
1.3 Regulative Rahmenbedingungen	37
1.3.1 Verbraucherschutz, Produktsicherheit und Arbeits-/Gesundheitsschutz	41
1.3.2 Umweltschutz	45
1.4 Umweltzeichen, Zertifizierungen und Förderprogramme	52
1.4.1 Umweltzeichen	53
1.4.2 Weitere produktbezogene Kennzeichnungen	57
1.4.3 Zertifizierung von Personal und Firmen.....	59
1.4.4 Förderprogramme	61
1.5 Geltungsbereich	62
2 Marktanalyse	65
2.1 Wärmepumpen im Kontext der Dekarbonisierung des Gebäudesektors.....	65
2.2 Marktentwicklung von Wärmepumpen.....	67
2.2.1 Überblick des Wärmepumpenmarkts.....	67
2.2.2 Wärmepumpenmarkt in Deutschland	69
2.2.3 Kältemittelnutzung für Hauswärmepumpen	73
2.2.4 Wesentliche Marktakteure und Produzenten	76
2.3 Einflussfaktoren auf die Marktentwicklung.....	79
2.3.1 Gesetzgebung und Förderprogramme zum Erreichen der Klimaziele im Gebäudesektor.....	79
2.3.2 Betriebskosten für Verbraucher	80
2.3.3 Handwerkskapazitäten	82
2.3.4 Einflussfaktoren in Zusammenhang mit Kältemitteleigenschaften.....	83
2.3.5 Zusammenfassung der Einflussfaktoren.....	84
2.4 Prognose des zukünftigen Wärmepumpenabsatzes und Wärmepumpenbestands	84

3	Technische Analyse	86
3.1	Grundlagen zum Aufbau und Betrieb von Wärmepumpen	86
3.1.1	Wirkprinzip	86
3.1.2	Grundsätzlicher Aufbau und Funktionsweise von Wärmepumpen	87
3.1.3	Betriebsweisen	88
3.2	Kältemittel und Materialbetrachtung	90
3.2.1	Kältemittel	90
3.2.2	Natürliche Kältemittel	92
3.2.3	Öl	98
3.2.4	Sonstige Materialbetrachtung	98
3.3	Effizienz von Hauswärmepumpen	99
3.3.1	Grundlagen und Einflussfaktoren	99
3.3.2	Kennzahlen zur Bewertung der Effizienz	101
3.3.3	Überblick der Effizienzen der Wärmepumpen am Markt	102
3.3.4	Feldstudien	108
3.3.5	Bauteile mit Relevanz für den effizienten Betrieb einer Wärmepumpe	112
3.3.6	Regelung, Monitoring und Integrierbarkeit	116
3.4	Geräuschemissionen	118
3.4.1	Grundlagen	118
3.4.2	Bauteile und Regelungsmöglichkeiten zur Geräuschreduzierung	119
3.5	Sonstige	121
4	Umweltwirkungen	122
4.1	Überblick	122
4.2	Relevante Aspekte der Lebenszyklusanalyse für Wärmepumpen	123
4.2.1	Treibhausgasemissionen	124
4.2.2	Versauerungspotenzial und Trifluoressigsäure	126
4.2.3	Weitere Umweltwirkungen	126
4.2.4	Materialien und Ressourceneffizienz	127
4.3	Lebenszyklusanalyse markttypischer R290-Hauswärmepumpen und Vergleichsfälle	128
4.3.1	Methodik	128
4.3.2	Quantifizierung von Primärenergie und THG-Emissionen	135
4.3.3	Quantitative Bewertung weiterer Umweltwirkungen	149
5	Rückmeldung von Stakeholdern zu möglichen Anforderungen	157
5.1	Einschätzung der Marktentwicklung (Geltungsbereich)	157

5.2	Umweltgerechte und ressourcenschonende Produktgestaltung	157
5.3	Energieeffizienz und Leistungszahlen	158
5.4	Sicherheitsvorkehrungen bei Verwendung natürlicher (brennbarer A3) Kältemittel	158
5.5	Betriebsgeräusche.....	159
5.6	Bedienerfreundlichkeit, Maximierung der Lebensdauer, Service und Wartung	159
5.7	Erfolgsaussichten eines neuen Blauen Engels für Hauswärmepumpen	160
6	Zwischenergebnisse im Hinblick auf die Kriterienentwicklung	161
7	Quellenverzeichnis	162
A	Kältemittel-Nomenklatur und Sicherheitsklassifizierung.....	171
A.1	ANSI/ASHRAE Standard 34-2019	171
A.2	ISO 817:2014-05 Kältemittelklassifizierung	171
B	Überblick WP-Modelle mit R290 Kältemittel	173

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Energieverbrauchskennzeichnung für Raumheizungswärmepumpen.....	49
Abbildung 2:	Absatzstruktur der Wärmeerzeuger im Hauptszenario (Klimaneutral 2050) für Wohngebäude.....	65
Abbildung 3:	Mit Wärmepumpen zum (Nahezu-)Null-Emissionen-Heizen ...	66
Abbildung 4:	Wärmepumpenabsatz im Jahr 2018 nach Wärmepumpentyp in 21 europäischen Ländern	68
Abbildung 5:	Wärmepumpenabsatz im Jahr 2019 je 1000 Haushalte in 21 europäischen Ländern	69
Abbildung 6:	Absatz der verschiedenen Wärmeerzeuger in Wohngebäuden in Deutschland von 2001 bis 2020.....	70
Abbildung 7:	Marktanteile von Wärmepumpen im deutschen Wohnungsneubau 2016 bis 2020	71
Abbildung 8:	Absatz von Heizungswärmepumpen nach Wärmequelle sowie Brauchwasser-Wärmepumpen.....	72
Abbildung 9:	Relativer Endverbraucher-Strompreis im Vergleich zum Gaspreis	81
Abbildung 10:	Zusammensetzung der Energieträgerpreise im Jahr 2020	82
Abbildung 11:	Prognose des Wärmepumpenbestands in Deutschland bis 2050 nach verschiedenen Studien	85
Abbildung 12:	Einsatzbereiche verschiedener Verfahren/Wirkprinzipien für Wärmepumpen	87
Abbildung 13:	Wärmepumpen Basis-Kreislauf	88
Abbildung 14:	Heizwärmebedarf des Gebäudes und Leistung Wärmepumpe in Abhängigkeit der Außentemperatur und Bivalenzpunkt	89
Abbildung 15:	Dampfdruckkurven ausgewählter Kältemittel	91
Abbildung 16:	Kältemittelfüllmenge nach Heizleistung für R290- Wärmepumpen, unterschieden nach Wärmepumpentyp	92
Abbildung 17:	Bilanzgrenzen nach VDI 4650	100
Abbildung 18:	Energieeffizienz von L/W-WP mit verschiedenen Kältemitteln nach Leistung (Designtemperatur 35°C)	103
Abbildung 19:	Energieeffizienz von L/W-WP mit verschiedenen Kältemitteln nach Leistung (Designtemperatur 55°C)	104
Abbildung 20:	Energieeffizienz von S/W-WP mit verschiedenen Kältemitteln nach Leistung (Designtemperatur 35°C)	105
Abbildung 21:	Energieeffizienz von S/W-WP mit verschiedenen Kältemitteln nach Leistung (Designtemperatur 55°C)	106
Abbildung 22:	Energieeffizienz von W/W-WP mit verschiedenen Kältemitteln nach Leistung (Designtemperatur 35°C)	107
Abbildung 23:	Energieeffizienz von W/W-WP mit verschiedenen Kältemitteln nach Leistung (Designtemperatur 55°C)	108
Abbildung 24:	Jahresarbeitszahlen von Wärmepumpen in Feldtests	109

Abbildung 25:	Praktische Jahresarbeitszahl für verschiedene Wärmepumpentypen	110
Abbildung 26:	Übersicht der WP-Monitoring Projekte des Fraunhofer ISE ..	111
Abbildung 27:	Darstellung der in Feldtests durch Fraunhofer ISE ermittelten Jahresarbeitszahlen (JAZ)	112
Abbildung 28:	Darstellung der Jahresarbeitszahlen (JAZ) in Feldtests durch Fraunhofer ISE nach mittlerer Heizkreistemperatur für L/W-WP	112
Abbildung 29:	Verdichter-Bauarten und Einsatzbereiche	113
Abbildung 30:	Schallpegel von L/W-WP mit verschiedenen Kältemitteln nach Leistung (Designtemperatur 35°C)	119
Abbildung 31:	Umweltwirkungen im Lebenszyklus einer Wärmepumpe	124
Abbildung 32:	THG-Emissionen und kumulierter Energieaufwand (KEA) der L/W- und S/W-WP (R290 Referenzfall) nach Anteilen am Lebenszyklus	136
Abbildung 33:	THG-Emissionen und KEA der L/W- und S/W-WP (Vgl. R290 hocheffizient) nach Anteilen am Lebenszyklus	139
Abbildung 34:	THG-Emissionen und KEA der L/W- und S/W-WP (R32- Vergleichsfall) nach Anteilen am Lebenszyklus	141
Abbildung 35:	Gegenüberstellung der THG-Emissionen aller Produktphasen der L/W-WP für R290-Referenzfall und Vergleichsfälle	143
Abbildung 36:	Gegenüberstellung der THG-Emissionen aller Produktphasen der S/W-WP für R290-Referenzfall und Vergleichsfälle	143
Abbildung 37:	THG-Emissionen nach Anteilen während der Produktionsphase der L/W-WP für R290-Referenzfall und Vergleichsfälle	144
Abbildung 38:	THG-Emissionen nach Anteilen während der Produktionsphase der S/W-WP für R290-Referenzfall und Vergleichsfälle	145
Abbildung 39:	THG-Emissionen nach Anteilen am Lebenszyklusende der L/W-WP für R290-Referenzfall und Vergleichsfälle.	146
Abbildung 40:	THG-Emissionen nach Anteilen am Lebenszyklusende der S/W-WP für R290-Referenzfall und Vergleichsfälle	147
Abbildung 41:	THG-Emissionen durch Kältemittel nach Anteilen am Produktzyklus für L/W-WP für R290-Referenzfall und Vergleichsfälle	148
Abbildung 42:	THG-Emissionen durch Kältemittel nach Anteilen am Produktzyklus für S/W-WP für R290-Referenzfall und Vergleichsfälle	149
Abbildung 43:	Umweltwirkungen einer L/W-WP nach Anteilen am gesamten Lebenszyklus	151
Abbildung 44:	Umweltwirkungen einer S/W-WP nach Anteilen am gesamten Lebenszyklus	152
Abbildung 45:	Ausgewählte Umweltwirkungen durch Herstellung von 1 Kilogramm Kältemittel des Typs R290 und R32	154

Abbildung 46:	Ausgewählte Umweltwirkungen durch Herstellung von 1 Kilogramm Kältemittel des Typs R290 und R32	155
---------------	--	-----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Abgrenzung des Geltungsbereichs	20
Tabelle 2:	Übersicht der Vergleichsfälle.....	24
Tabelle 3:	Überblick wesentlicher Regularien mit Relevanz zur Produktgruppe.....	39
Tabelle 4:	Grenzwerte für die Kältemittel-Füllmenge nach DIN EN 378 im Anwendungsbereich „Menschlicher Komfort“ am Beispiel Propan bei Hauswärmepumpen.....	45
Tabelle 5:	Immissionsrichtwerte nach TA Lärm	48
Tabelle 6:	Anforderungen an den Schallleistungspegel von Raumheizgeräten und Kombiheizgeräten mit Wärmepumpe gemäß Verordnung (EU) Nr. 813/2013	50
Tabelle 7:	Anforderungen an den Schallleistungspegel von Warmwasserbereitern mit Wärmepumpe gemäß Verordnung (EU) Nr. 814/2013.....	51
Tabelle 8:	Vergleich von Umweltzeichen für Hauswärmepumpen.....	53
Tabelle 9:	Übersicht über die Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG).....	61
Tabelle 10:	Übersicht Förderprogramme.....	61
Tabelle 11:	Anforderungen an die jahreszeitbedingte Raumheizungseffizienz	62
Tabelle 12:	Abgrenzung des Geltungsbereiches	62
Tabelle 13:	Absatz von Wärmepumpen nach Wärmequelle und Bauart ...	72
Tabelle 14:	Prozentuale Marktanteile der Wärmepumpentypen in Deutschland im Jahr 2020 unterteilt nach Heizleistung.....	73
Tabelle 15:	Anteile der eingesetzten Kältemittel an den aktuell verfügbaren WP-Modellen	74
Tabelle 16:	Marktdurchdringungsraten bezogen auf Kältemittelmengen für Wärmepumpen-Neuanlagen mit Projektion bis 2030	75
Tabelle 17:	Übersicht der wichtigsten Hersteller am deutschen Markt	76
Tabelle 18:	Hersteller von R290 Wärmepumpen mit geringen Marktanteilen in Deutschland.....	78
Tabelle 19:	Verfügbarkeit von Propan-Wärmepumpen nach Heizleistung und Typ	79
Tabelle 20:	Physikalische Kennwerte von Kältemitteln	96
Tabelle 21:	Referenzfall der R290-Hauswärmepumpen für LCCP- Berechnung.....	129
Tabelle 22:	Annahmen des Energieaufwands im Herstellungsprozess je Einheit in kg	130

Tabelle 23:	Emissionsfaktoren verschiedener Energieträger (CO ₂ -Äq. inklusive Vorkette).....	131
Tabelle 24:	Annahmen zur Berechnung des jährlichen Wärmebedarfs ...	132
Tabelle 25:	Energieaufwand und THG-Emissionen für Transport, Recycling, Abfallbehandlung und Entsorgung	134
Tabelle 26:	Variante der LCCP-Berechnung für hocheffiziente R290-Hauswärmepumpen	135
Tabelle 27:	Variante der LCCP-Berechnung für Vergleichsfall mit R32.....	135
Tabelle 28:	THG-Emissionen, Kumulierter Energieaufwand nicht-erneuerbar sowie erneuerbar für L/W- und S/W-WP (R290 Referenzfall) nach Lebenszyklusphase einschließlich des Kältemittels.....	137
Tabelle 29:	THG-Emissionen, Kumulierter Energieaufwand nicht-erneuerbar sowie erneuerbar für L/W- und S/W-WP (Vergleichsfall für hocheffiziente R290-Wärmepumpen) nach Lebenszyklusphase einschließlich des Kältemittels.....	139
Tabelle 30:	THG-Emissionen, Kumulierter Energieaufwand nicht-erneuerbar sowie erneuerbar für L/W- und S/W-WP (Vergleichsfall für R32-Wärmepumpen) nach Lebenszyklusphase einschließlich des Kältemittels.....	141
Tabelle 31:	Weitere Umweltwirkungen einer L/W-WP	151
Tabelle 32:	Weitere Umweltwirkungen einer S/W-WP	153
Tabelle 33:	Umweltwirkungen bei Herstellung und Recycling ausgewählter Kältemittel je 1 Kilogramm Kältemittel	155
Tabelle 34:	Einteilung der Kältemittel nach ISO 817:2014-05	172
Tabelle 35:	Überblick der Wärmepumpenmodelle mit R290	173

Abkürzungsverzeichnis

ABL	Abluft
AC	Alternating Current (Wechselstrom)
ADPE	Abiotic Resource Depletion Potential for Elements (Potenzial für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen)
AFPAC	Association Française pour les pompes à chaleur
AP	Acidification Potential (Versauerungspotenzial)
ArbSchG	Arbeitsschutzgesetz
ArbStättV	Arbeitsstättenverordnung
ASR	Technische Regeln Arbeitsstätten
AUL	Außenluft
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
BbergG	Bundesberggesetz
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.
BDH	Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie e.V.
BEG	Bundesförderung für effiziente Gebäude
BetrSichV	Betriebssicherheitsverordnung
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BWP	Bundesverband Wärmepumpe
CC	Conversion Coefficient (Umwandlungsfaktor)
CEN	Comité Européen de Normalisation
ChemG	Chemikaliengesetz
ChemKlimaschutzV	Chemikalien-Klimaschutzverordnung
CLP	Classification, Labelling, Packaging
COP	Coefficient of Performance (Leistungszahl)
dB(A)	A-bewerteter Schalldruckpegel, wobei dB für Dezibel und (A) für die international genormten Frequenzbewertungskurve A steht
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DIN	Deutsches Institut für Normung
DSM	Demand Side Management (Nachfragesteuerung)
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V
EC	Electronically Commuted
EE-WärmeG	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
EER	Energy Efficiency Ratio (Energiewirkungsgrad)

EEV	Elektronische Expansionsventile
EG	Europäische Gemeinschaft
EHPA	European Heat Pump Association
ElektroG	Elektrogesetz
ElektroStoffV	Elektro- und Elektronikgeräte-Stoff-Verordnung
EN	Europäische Norm
EnVKG	Energieverbrauchskennzeichnungsgesetz
EP	Eutrophication Potential (Eutrophierungspotenzial)
ErP	Energy-related Products (Energieverbrauchsrelevante Produkte)
EU	Europäische Union
EVPG	Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz
F-Gase	Fluorierte Treibhausgase
F-Gase-Verordnung	EU Verordnung über fluorierte Treibhausgase (Verordnung (EU) Nr. 517/2014)
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
FKW	Fluorkohlenwasserstoffe
FW	Fresh Water – net use of (Süßwasserressourcen)
GefStoffV	Gefahrstoffverordnung
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GHS	Global Harmonised Standard
GWP	Global Warming Potential (Treibhauspotenzial)
HFCKW	Teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe
HFKW	Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe
HFO	Hydrofluorolefine
HP	Heat Pump (Wärmepumpe)
HWD	Hazardous Waste Disposed (Gefährlicher Abfall zur Deponie)
IBP	Fraunhofer-Institut für Bauphysik
IEA	International Energy Agency (Internationale Energieagentur)
IEC	International Electrotechnical Commission (Internationale Elektrotechnische Kommission)
ISE	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
iSFP	individueller Sanierungsfahrplan
ISO	International Organization for Standardization
JAZ	Jahresarbeitszahl
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
L/L-WP	Luft/Luft-Wärmepumpe
L/W-WP	Luft/Wasser-Wärmepumpe
LCCP	Life Cycle Climate Performance

LFL	Lower Flammable Limit (Untere Explosionsgrenze)
LImSchG	Landes-Immissionsschutzgesetz
LQS-EWS	Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden
LVD	Low Voltage Directive (Niederspannungsrichtlinie)
LWG	Landeswassergesetz
LWT	Lamellen-Wärmeübertrager
MD	Machine Directive (Maschinenverordnung)
NHWD	Non-hazardous Waste Disposed (nicht gefährlicher Abfall)
ODP	Ozone Depletion Potential (Ozonabbaupotenzial)
PED	Pressure Equipment Directive (Druckgeräteverordnung)
PER	Primary Energy Ratio (Heizzahl)
PFAS	Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen
PID	Proportional-Integral-Differential
ProdSG	Produktsicherheitsgesetz
ProdSV	Verordnungen zum Produktsicherheitsgesetz
PVT	Photovoltaic Thermal (Photovoltaik und Solarthermie)
PWT	Plattenwärmeübertrager
ROHS	Restriction of Hazardous Substances (Beschränkung [der Verwendung bestimmter] gefährlicher Stoffe)
RWD	Radioactive Waste Disposed (Radioaktiver Abfall)
S/W-WP	Sole/Wasser-Wärmepumpe
SCOP	Seasonal coefficient of performance (jahreszeitbedingte Raumheizungs-Energieeffizienz)
SG	Smart Grid
SGB	Sozialgesetzbuch
TA Lärm	Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm
TA Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
TEAP	Technology and Economic Assessment Panel (Ausschuss für technologische und wirtschaftliche Untersuchungen)
TEV	Thermostatische Expansionsventile
TEWI	Total Equivalent Warming Impact
TFA	Trifluoroacetic acid (Trifluoressigsäure)
THG	Treibhausgas
TRBS	Technischen Regeln für Betriebssicherheit
TRGS	Technischen Regeln Gefahrstoffe
TRL	Technology Readiness Level (Technologie-Reifegrad)
UBA	Umweltbundesamt
UML	Umluft
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik

VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VOC	Volatile Organic Compound (Leichtflüchtige organische Verbindung)
W/W-WP	Wasser/Wasser-Wärmepumpe
WEEE	Waste of Electrical and Electronic Equipment (Elektro- und Elektronikgeräte-Abfall)
WP	Wärmepumpe

Zusammenfassung

Hauswärmepumpen, also solche Wärmepumpen, die in Ein- oder Mehrfamilienhäusern zur Beheizung der Räume oder auch gleichzeitig der Warmwasserbereitung dienen, kommt bei der Erreichung der Klimaziele für den Gebäudebereich eine tragende Rolle zu. Sie können maßgeblich zur Dekarbonisierung beitragen, da sie mit Strom betrieben werden, der zunehmend aus regenerativen Quellen gewonnen wird. Eine hohe Energieeffizienz dieser Produkte ist beim prognostizierten Anstieg trotzdem besonders wichtig, damit das Stromnetz nicht unnötig belastet wird und natürlich auch, um nicht unnötig viel Strom zu verbrauchen, solange dieser nicht komplett aus regenerativen Quellen gewonnen wird.

Zudem nutzen die meisten Wärmepumpen noch fluorierte Kältemittel, die aufgrund ihres Treibhauspotenzials und atmosphärischer Abbauprodukte vermieden werden sollten. Daher beabsichtigt das Umweltbundesamt eine Neuauflage eines Umweltzeichens Blauer Engel für Hauswärmepumpen. Die Nutzung von natürlichen Kältemitteln steht als Kriterium bereits fest; weitere Kriterien werden im Rahmen des Projekts „Hauswärmepumpen mit natürlichem Kältemittel – Entwicklung von Anforderungen an klimafreundliche und energieeffiziente Geräte für den Blauen Engel“ erarbeitet.

Dieser Zwischenbericht stellt die Grundlage für die Entwicklung von konkreten Kriterienvorschlägen für einen zukünftigen Blauen Engel für die Produktgruppe Hauswärmepumpen dar. Hierfür wurden die aktuelle Marktsituation und der Stand der Technik mit Blick auf die Durchdringung des Marktes mit natürlichen Kältemitteln untersucht. Außerdem beleuchtet der Bericht weitere Umweltwirkungen von Wärmepumpen, die beispielsweise mit den verwendeten Materialien und Geräuschemissionen zusammenhängen.

Das erste Kapitel gibt einen Überblick über die Produktgruppe „Hauswärmepumpen“, den regulativen Kontext sowie Aspekte in Bezug auf vorhandene Umweltzeichen, Zertifizierungen und Fördermöglichkeiten. Die Kategorisierung von Wärmepumpen orientiert sich anhand der verwendeten Wärmequelle (Außenluft, Erdreich oder Wasser) und Wärmesenke (Luft oder Wasser). Zusätzlich wird zwischen dem Zweck der Raumheizung, der Bereitstellung von Brauchwarmwasser und deren Kombination in einem Gerät unterschieden.

Natürliche Kältemittel sind prinzipiell für den Einsatz in Hauswärmepumpen geeignet und werden auch bereits eingesetzt. Hier sind bisher vornehmlich Wärmepumpen mit dem natürlichen Kältemittel R290 (Propan) auf dem Markt. R290 ist ein Kohlenwasserstoff und wird gemäß DIN EN 378-1 als brennbares Kältemittel der Sicherheitsstufe A3 (leicht entflammbar) eingestuft. Das führt derzeit zu Einschränkungen: A3-Kältemittel dürfen nach dem aktuellen Produktsicherheitsstandard DIN EN 60335-2-40 im Innenbereich nur in geringen Füllmengen (unter 150 Gramm) eingesetzt werden bzw. in Abhängigkeit von Raumgröße und Höhe der Aufstellung bis zu 998 Gramm. Bei größeren Füllmengen sind zusätzliche technische Maßnahmen wie zum Beispiel zur Entlüftung erforderlich.

Über den Sicherheitsaspekt in Bezug auf die Brennbarkeit von A3-Kältemitteln wie R290 hinaus gibt es weitere Anforderungen bezüglich der Produktsicherheit, des Umwelt- und Gesundheitsschutzes, denen alle Hauswärmepumpen entsprechen müssen. Hier wird die Produktgestaltung maßgeblich durch Europäische Union (EU)-Verordnungen und -Richtlinien und deren Bezug auf harmonisierte Normen bestimmt, sowie deren Umsetzung in nationale Gesetze oder Richtlinien.

Wichtig zur Einordnung der Kältemittel-Thematik ist die Verordnung (EU) Nr. 517/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. April 2014 über fluorierte Treibhausgase und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 842/2006 (**F-Gas-Verordnung**) (EU, 2014d), denn

diese regelt die Reduzierung von Emissionen fluorierter Treibhausgase und wird die Möglichkeiten, diese in Wärmepumpen einzusetzen, zunehmend einschränken. Hiervon sind natürliche Kältemittel nicht betroffen. Vielmehr trägt ein verstärkter Einsatz natürlicher Kältemittel in Wärmepumpen zur Erreichung der Ziele der Verordnung (Umweltschutz durch Minderung der Emissionen von fluorierten Treibhausgasen) bei, wenn durch die Verfügbarkeit geeigneter Alternativen weitere Verbote von fluorierten Kältemitteln möglich werden.

Wärmepumpen müssen weiterhin den für Elektrogeräte relevanten Richtlinien und Gesetzen zur Verwendung von Stoffen (z.B. Verbot von Blei, Quecksilber etc.) sowie zur Entsorgung entsprechen. Besonderheiten ergeben sich bei den Sole/Wasser-Wärmepumpen (S/W-WP) und Wasser/Wasser-Wärmepumpen (W/W-WP), die das Erdreich bzw. Grundwasser als Wärmequelle nutzen, wofür Bohrungen für Erdwärmesonden oder Brunnen durchgeführt werden. Hier müssen Wasser- und Bergbaurecht beachtet werden. Weiterhin ist eine Zertifizierung der Bohrfirmen und Brunnenbauer relevant.

Die EU-Verordnung (EU) Nr. 813/2013 zum **Ökodesign** legt Mindestanforderungen an die Effizienz und Umweltverträglichkeit von Raumheizungswärmepumpen oder Kombi-Wärmepumpen, die kombiniert zur Raumheizung und Warmwasserbereitung genutzt werden, fest. Darüber hinaus legt sie fest, wie die Energieeffizienz für Raumheizung und Warmwasserbereitung zu ermitteln ist. Die minimale saisonale Raumheizungs-Energieeffizienz, für ein europäisches Referenzklima („Warm“ Athen, „Durchschnittlich“ Straßburg, „Kalt“ Helsinki) ist:

- ▶ Raumheizgeräte und Kombiheizgeräte mit Wärmepumpe, außer Niedertemperatur-Wärmepumpen: Die jahreszeitbedingte Raumheizungs-Energieeffizienz darf nicht unter 110 Prozent fallen.
- ▶ Niedertemperatur-Wärmepumpen: Die jahreszeitbedingte Raumheizungs-Energieeffizienz darf nicht unter 125 Prozent fallen.

Die Verordnung (EU) Nr. 811/2013 regelt die **Energieverbrauchskennzeichnung** dieser Geräte.

- ▶ Niedertemperatur-Wärmepumpen mit einer jahreszeitbedingten Raumheizungseffizienz η_{s} ≥ 175 Prozent erhalten die Klasse A+++; solche für Mitteltemperaturanwendungen erhalten A+++ ab $\eta_{s} \geq 150$ Prozent.
- ▶ Bei der Warmwasserbereitungsenergieeffizienz für Kombiheizgeräte und Warmwasserbereitern werden die Klassen nach Lastprofilen eingeteilt; im Lastprofil L beispielsweise erhält ein Gerät die Klasse A+++ für ein η_{wh} von ≥ 188 Prozent (EU, 2013a, 2013b).

Die relevanten Standards sind DIN EN 14511-1 bis -4 „zu den Messmethoden und Bedingungen für die Leistungszahl im Heizbetrieb COP (Coefficient of Performance) sowie für die Berechnung der jahreszeitbedingten Raumheizungs-Energieeffizienz (η_s) oder der jahreszeitbedingten Leistungszahl (SCOP) DIN EN 14825 bzw. DIN EN 15879-1 für Direktübertragung/Wasser-Wärmepumpe.

Bei außen aufgestellten Luft/Wasser-Wärmepumpen (L/W-WP) ist zusätzlich die Einhaltung von Lärmschutzvorgaben wichtig, da **Geräuschemissionen** in Wohngebieten die Gesundheit beeinträchtigen können. Konkrete Richtwerte für Tag und Nacht und für verschiedene Kategorien von Wohngebieten gibt die Technische Anleitung (TA) Lärm vor. Auch die Vorgaben zum EU-Ökodesign beinhalten für Wärmepumpen einen maximalen Schallleistungspegel, der

nach EN 12102 festgestellt und angegeben werden muss. In der Praxis müssen Installateure*Installateurinnen zusätzlich einen geeigneten Aufstellungsort wählen und somit gewährleisten, dass die maximal zulässigen Geräuschemissionen nach TA Lärm nicht überschritten werden.

Im Gegensatz zu den verbindlichen Vorgaben an Mindesteffizienz, Geräuschemissionen und umweltgerechter Produktgestaltung, gibt es freiwillige **Umweltzeichen** wie den Blauen Engel, den Nordic Swan oder das Europäische Umweltzeichen. Alle drei Zeichen gab es in der Vergangenheit auch für Wärmepumpen; aktuell gibt es jedoch kein freiwilliges Umweltzeichen (Typ-1 nach DIN EN ISO 14024) für Wärmepumpen in Europa. Der entsprechende Blaue Engel endete 2017. Die Produktgruppe umfasste auch mit Gasmotoren betriebene Absorptions- bzw. Adsorptions-Wärmepumpen. Der Blaue Engel stellte Anforderungen in Form von Total Equivalent Warming Impact (TEWI)-Grenzwerten, sowie maximalen Geräuschemissionen, aber auch zum Einsatz hocheffizienter Umwälzpumpen und an die Produktinformationen für Fachpersonal und Endkund*innen. Neben dem Blauen Engel gab es bis 2016 auch ein EU Ecolabel für Elektro-, Gasmotor- oder Gasabsorptionswärmepumpen, welches ebenso den TEWI-Ansatz nutzte, zusätzlich jedoch bei Einsatz eines Kältemittels mit einem Treibhauspotenzial (im Englischen: Global Warming Potential, GWP) unter 150 eine bis zu 15 Prozent niedrigere Effizienz erlaubte. Während das EU Ecolabel für Warmwasser-Heizgeräte nach wie vor gültig ist, wurde das EU Ecolabel für Wärmepumpen (2007/742/EG) aufgrund fehlender Zeichennehmer 2016 eingestellt. Auch der Nordic Swan für Wärmepumpen, der sich an den Effizienzanforderungen der EU-Energieeffizienzkennzeichnung orientierte wurde inzwischen eingestellt, da sich nur ein Zeichennehmer gefunden hatte.

Auf dem europäischen Markt etabliert sind dagegen die freiwilligen, produktbezogenen **Kennzeichnungen** Heat Pump (HP) Keymark mit aktuell 3900 zertifizierten Modellen und EHPA (European Heat Pump Association) Quality Label mit über 6000 Modellen. HP Keymark dient der Überprüfung der Herstellerdeklaration und der gesetzlichen Anforderungen (Ökodesign) durch unabhängige Dritte, während das EHPA Quality Label in einigen Aspekten zusätzlich über die gesetzlichen Mindestanforderungen hinausgeht. Neben weniger gängigen und nationalen Zertifizierungen gibt es außerdem das „SG (Smart Grid) Ready“-Label, mit welchem Wärmepumpen ausgezeichnet werden können, die zum Lastmanagement der Stromnetze beitragen.

In Deutschland gibt es für Wärmepumpeninstallateure eine optionale Qualifizierung nach VDI 4645 (Sachkundiger für Wärmepumpensysteme nach VDI 4645). Wenn Installation oder Wartung Eingriffe in den Kältemittelkreislauf erfordern, ist jedoch auch die Zertifizierung bzw. der Nachweis der entsprechenden Sachkunde nach F-Gas-Verordnung nötig. Weiterhin erfordert die Elektroinstallation von Wärmepumpen eine Beachtung der einschlägigen Normen wie DIN EN 50220-1 (Betrieb von elektrischen Anlagen). Für die Zertifizierung von Bohrfirmen für Erdwärmesonden ist die Technische Regel DVGW W 120-2 „Qualifikationsanforderungen für die Bereiche Bohrtechnik und oberflächennahe Geothermie (Erdwärmesonden)“ relevant.

Deutschland fördert den Einbau von Wärmepumpen im Rahmen seiner Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG). Für den Einbau einer Wärmepumpe bei der Sanierung können Zuschüsse bis zu 50 Prozent über die BAFA aus dem BEG Einzelmaßnahme (EM) Programm genutzt werden. Zusätzlich ist für die Gebäudesanierung auch eine Förderung für Fachplanung und Baubegleitung eingeführt. Gleichzeitig wird ein individueller Sanierungsfahrplan (iSFP) honoriert. Wird ein individueller Sanierungsfahrplan umgesetzt, so erhöht sich der vorgesehene Fördersatz um fünf Prozent für diese Maßnahme.

Als möglichen **Geltungsbereich** für einen Blauen Engel werden schließlich serienmäßig hergestellte elektrisch betriebene Wärmepumpen vorgeschlagen, die zur Raumbeheizung oder in Kombination zur Raumbeheizung und Warmwasserbereitung dienen. Als Größenordnung wird eine Nennwärmeleistung von max. 70 Kilowatt in Betracht gezogen.

Tabelle 1: Abgrenzung des Geltungsbereichs

Merkmal zur Abgrenzung des Geltungsbereichs	Beschreibung
Produkttyp	Serienmäßig hergestellte Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern
Funktion	Raumbeheizung mit oder ohne Warmwasserbereitung
Nennwärmeleistung	Bei L/W-WP, S/W-WP und W/W-WP bis zu 70 kW für Wärmeabgabe an wasserbasierte Heizkreise (nach Norm-Nennbedingungen der EN 14511-2)

Das zweite Kapitel gibt einen Marktüberblick mit Fokus auf die Situation in Deutschland. Da die Wärmeversorgung von Privathaushalten (Raumheizung und Warmwasser) einen Großteil von deren Endenergieverbrauch ausmacht, wird Wärmepumpen eine ausschlaggebende Rolle für das Erreichen der Klimaziele zugeschrieben. Der Einsatz von Wärmepumpen anstelle von Gas- oder Ölheizungen kann zur Unabhängigkeit von fossilen Brennstoffen im Gebäudesektor beitragen, sofern sie mit Strom aus erneuerbaren Quellen betrieben werden. Privathaushalte mit eigener Stromerzeugung aus Photovoltaik-Anlagen können ihren produzierten Strom direkt für den Betrieb der Wärmepumpen selbst nutzen. Außerdem können Wärmepumpen dazu beitragen, die Stromversorgung durch intelligente Steuerung sowie durch Nutzung thermischer Speicher und Stromspeicher zu optimieren und unterschiedliche Spitzen bei Angebot und Nachfrage auszugleichen. Um insgesamt auf nahezu Null Emissionen im Bereich der Gebäudeheizung zu kommen, ist neben der Energieeffizienz und der Stromversorgung aus erneuerbaren Quellen auch der Einsatz von natürlichen Kältemitteln mit geringem oder vernachlässigbarem GWP unabdingbar.

Im Wohnungsneubau sind Wärmepumpen in Deutschland seit 2020 die führende Heizungstechnik. Im Wohnungsbestand haben Wärmepumpen dagegen erst einen geringen Marktanteil – 2019 lag dieser bei nur 2,4 Prozent (BDEW, 2020). Die Absatzzahlen sind in den letzten Jahren kontinuierlich angestiegen. Im Jahr 2020 wurden in Deutschland 140.500 Wärmepumpen verkauft, davon 120.000 Heizungswärmepumpen. Der Absatz von Heizungswärmepumpen hat dabei im Vergleich zum Vorjahr um 40 Prozent zugenommen. Den mit Abstand größten Absatz haben dabei L/W-WP (95.500 Geräte). Daneben wurden 2020 je 20.500 Brauchwarmwasser-WP sowie S/W-WP und 4.000 W/W-WP verkauft. 69,5 Prozent der verkauften Heizungswärmepumpen hatten eine Wärmeleistung unter 10 Kilowatt; 26,5 Prozent hatten eine Wärmeleistung zwischen 10 und 20 Kilowatt.

Am stärksten werden derzeit noch halogenierte Kältemittel eingesetzt. Die meisten Modelle nutzen derzeit noch R410A (66,1 Prozent bei L/W-WP, 70,8 Prozent bei S/W-WP und 68,9 Prozent bei W/W-WP). Bei den L/W-WP liegt R32 an zweiter Stelle, gefolgt von R407C. Bei den S/W-WP und W/W-WP dagegen liegt R407C an zweiter Stelle, gefolgt von R134a.

4,9 Prozent der L/W-WP-Modelle nutzen das Kältemittel R290; bei den S/W-WP liegt der Anteil bei 1,4 Prozent und bei W/W-WP bei 2,2 Prozent.

Die neuen Gemische mit Hydrofluorolefinen (HFO), wie R454B und R454C finden nur bei weniger als einem Prozent der L/W-WP-Modelle Einsatz.

Während noch unklar ist, ob sich die Gemische mit HFO, wie R454C, R455A oder R454B am Markt etablieren, wird ein zunehmender Anteil des natürlichen Kältemittels R290 auf bis zu 30 Prozent im Jahr 2030 angenommen. Diese Einschätzung aus einer vorangegangenen Untersuchung für das Umweltbundesamt (UBA) wurde auch durch die Herstellergespräche, die in diesem Projekt geführt wurden, bestätigt.

In Deutschland werden Wärmepumpen sowohl von global agierenden Herstellern aus Südostasien verkauft als auch von zahlreichen etablierten Herstellern aus Deutschland, Skandinavien und Österreich. Neben etablierten Herstellern herkömmlicher Heizsysteme, die nun auch ein breites Spektrum an Wärmepumpenbauarten und Leistungsbereichen anbieten, sind auch Unternehmen vertreten, die sich auf Wärmepumpen oder sogar auf bestimmte Bauarten spezialisiert haben. Des Weiteren gibt es kleinere Wärmepumpenhersteller mit kleineren Marktanteilen von Hauswärmepumpen in Deutschland, die (teilweise ausschließlich) Wärmepumpensysteme mit natürlichem Kältemittel anbieten.

Als Einflussfaktoren auf die Marktentwicklung wurden folgende identifiziert: Einerseits profitiert der Wärmepumpenmarkt von Förderprogrammen für den Einbau in Neubauten sowie für Kombinationen aus Sanierung und Einbau von Wärmepumpen in Bestandsbauten.

Andererseits wirken aber einige Faktoren als Barrieren:

1. Der hohe Strompreis führt dazu, dass Wärmepumpen im Vergleich zu Gas- und Ölheizungen oft nicht wirtschaftlich betrieben werden können. Eine hohe CO₂-Bepreisung, die höher ist, als die momentan beschlossene und vor allem Gas und Öl verteuert, sowie eine Abschaffung der Erneuerbare Energie Gesetz (EEG)-Umlage oder andere Reduzierung der Stromkosten, könnten den Markt positiv beeinflussen.
2. Kapazitätsengpässe bei Handwerkern*Handwerkerinnen und Unsicherheit in der Beratung hinsichtlich der langfristigen Betriebskosten und Wirtschaftlichkeit der Wärmepumpe.

Spezifische Barrieren für das Wachstum am Markt von Wärmepumpen mit brennbaren Kältemitteln sind die Vorgaben der Normen zur Füllmenge sowie höhere Produktionskosten durch eingebaute Sicherheitsmaßnahmen. In Fällen, in denen sich eine Innenaufstellung anbietet (aufgrund der engen Bebauung und potenziellen Geräuschbelästigung der Nachbarn), haben Wärmepumpen mit nicht-brennbaren Kältemitteln dadurch bislang noch einen Vorteil.

Im dritten Kapitel werden die technischen Aspekte im Hinblick auf mögliche Umweltwirkungen, insbesondere die Energieeffizienz, die Kältemittel sowie die Geräuschemissionen näher betrachtet. Zunächst werden der grundsätzliche Prozessablauf sowie die verschiedenen Betriebsweisen bei Wärmepumpen erläutert.

Die grundsätzliche Eignung eines Kältemittels ergibt sich aus der Dampfdruckkurve und den Eckpunkten Normalsiedetemperatur und kritischer Punkt. Aufgrund der thermodynamischen Eigenschaften sind Kohlenwasserstoffe ausgezeichnete Kältemittel. Eine im Vergleich mit anderen Kältemitteln relativ flache Dampfdruckkurve für R290 begünstigt grundsätzlich eine höhere Verdichtereffizienz aufgrund der geringeren Druckdifferenzen und Druckverhältnisse im Vergleich zu R32, R454C oder R410A. Verdichter benötigen für den sicheren Betrieb Öl zur Schmierung der bewegten Bauteile. Vorteilhaft bei Einsatz von Kohlenwasserstoffen ist die gute Löslichkeit mit dem Öl, die zum guten Abtransport aus dem Verdampfer durch die Viskositätsminderung führt. In der Praxis wirkt sich dies positiv auf die Effizienz der Wärmepumpe aus.

Unterschiedliche Füllmenge verschiedener Kältemittel werden bei gleichen Wärmeübertragergrößen bzw. Anlagenkonfigurationen im Wesentlichen durch die Dichten der Flüssigkeit im Verflüssiger vorgegeben. Bei kleinerer Leistung ist die Füllmenge pro Kilowatt

relativ höher. Bei den brennbaren Kohlenwasserstoffen ist eine Verringerung der benötigten Kältemittelmenge besonders relevant, da sie bei der Innenaufstellung erhöhten Anforderungen der DIN EN 378 bzw. DIN EN 60335-2-40 unterliegen. Andere Kohlenwasserstoffe (R600a, R1270) oder Gemische wie R441A (Propan und Propen) sind zwar grundsätzlich ebenso geeignet, bisher wird jedoch bei Wärmepumpen in den haushaltsüblichen Größen in erster Linie R290 eingesetzt.

Auch das natürliche und zudem nicht brennbare Kältemittel R744 (CO₂) kommt für den Einsatz in Wärmepumpen infrage. Mit R744 können gut hohe Vorlauftemperaturen erzielt werden, was eine gute Eignung für die Warmwasserbereitung bedeutet. Der hohe Temperaturgleit im überkritischen Betrieb bedingt allerdings große Temperaturdifferenzen im Vor- und Rücklauf was den Einsatz in Raumheizungssystemen nur schwer möglich macht. Es wird eher in großen Anwendungsbereichen zur kommerziellen und industriellen Wärmeversorgung genutzt. Der Einsatz weiterer natürlicher Kältemittel, u.a. Ammoniak (R717), Wasser (R718) und Luft ist denkbar, derzeit in der Praxis in Hauswärmepumpen jedoch nicht absehbar.

Die Anforderungen an die in Hauswärmepumpen verwendeten Materialien werden stark durch technische Anforderungen geprägt. Dies sind zum einen die Materialverträglichkeit gegenüber dem verwendeten Kältemittel und dem eingesetzten Öl sowie die Anforderungen an die Festigkeiten, Stabilität und Dichtheit. Da die Druck- und Temperaturlagen der natürlichen Kältemittel (mit Ausnahme von R744) in ähnlichen Größenordnungen wie die der fluorierten Kältemittel liegen, ergibt sich somit kein Nachteil bei Einsatz der natürlichen Kältemittel.

Die Effizienz von WP wird maßgeblich durch die Temperaturen auf der Wärmequellen- und Wärmesenkenseite bestimmt. Niedrige Wärmesenkentemperaturen (z.B. bei 35°C benötigter Vorlauftemperatur für Fußbodenheizung) und höhere Wärmequellentemperaturen (insbesondere bei Wasser als Wärmequelle) führen zu höheren Leistungszahlen. Für die Erfüllung der ErP-Richtlinie werden die SCOP-Werte berechnet (nach DIN EN 14825). Basis sind Labormessungen (nach DIN EN 14511 für die Raumheizung bzw. DIN EN 16147 für Warmwasserwärmepumpen) der Leistungszahlen in definierten Betriebspunkten, die gewichtet nach Häufigkeit der Temperaturstunden je Betriebspunkt umgerechnet werden. Der Wert η_{s} (η_{s}) ist die „jahreszeitbedingte Raumheizungs-Energieeffizienz“¹. Der Wert wird berechnet aus dem Quotienten aus dem von einem Heizgerät gedeckten Raumheizwärmebedarf für eine bestimmte Heizperiode und dem zur Deckung dieses Bedarfs erforderlichen jährlichen Primärenergieverbrauch in Prozent. Der Wert wird berichtigt um die Beiträge zur Berücksichtigung der Temperaturregler sowie, bei Raumheizgeräten oder Kombiheizgeräten mit W/W-WP- oder S/W-WP, des Stromverbrauchs der Grundwasserpumpe(n).

Eine Analyse der am Markt verfügbaren Geräte anhand der österreichischen Datenbank *get*, ergänzt um einige in Deutschland zusätzlich erhältlichen Geräte der Firma Hautech zeigt, dass L/W-WP mit den R290 und R32 im Niedertemperaturbereich (35°C Vorlauftemperatur) bis 15 Kilowatt Leistung die höchsten Effizienzwerte haben. Bei höheren Leistungsklassen liegen hier R32 und R410A an der Spitze der Kältemittel, wobei hier noch gar keine R290-Geräte vorhanden sind. Bei 55°C Vorlauftemperatur sind bis zu einer Leistung von 15 Kilowatt R290-Geräte die effizientesten. Das gleiche gilt für S/W-WP in der Niedertemperaturanwendung: Im Bereich bis 15 Kilowatt liegen auch hier die Geräte mit R290 als Kältemittel an der Spitze. Hier gibt es in

¹ Die Verordnungen für Raumheizgeräte und Warmwassererzeuger zur Durchführung der Ökodesign-Richtlinie haben das Ziel, Anforderungen für das Inverkehrbringen von Produkten in der EU festzulegen. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, verschiedene Technologien für die betrachteten Anwendungsfälle hinsichtlich ihrer Energieeffizienz zu bewerten und auch mit anderen Heiztechniken vergleichbar zu machen. Aus diesem Grund werden die Arbeitszahlen primärenergetisch bewertet. Im konkreten Fall wird der SCOP mit dem Umwandlungsfaktor CC (Conversion Coefficient, entspricht dem Primärenergiefaktor) ins Verhältnis gesetzt. In den Ökodesign-Verordnungen und Energieverbrauchskennzeichnung-Verordnungen ist der Wert für CC auf 2,5 fixiert (EU, 2013c, 2013d, 2013a, 2013b). Die Basis für diesen Wert bildet die Richtlinie 2012/27/EU.

allen Leistungsklassen viele effiziente WP mit dem Kältemittel R410A. Bei der Vorlauftemperatur von 55°C liegen Modelle mit R410A oder R407C mit den höchsten Effizienzwerten vorn, zwei R290-Geräte haben auch hier hohe Effizienzwerte, ansonsten sind die R290-Geräte eher im Mittelfeld zu finden. Über 15 Kilowatt Leistung sind momentan keine S/W-WP mit R290 Kältemittel am Markt verfügbar. Bei den W/W-WP im Niedertemperaturbereich sind die Geräte mit R410A die effizientesten; gibt es jedoch bis 20 Kilowatt Leistung auch sehr effiziente R290-Geräte. Bei der Vorlauftemperatur von 55°C verwenden die effizientesten W/W-WP die Kältemittel R410A oder R407C. R290 erreicht hier nur Durchschnittswerte. In den höheren Leistungsklassen über 20 Kilowatt sind auch bei den W/W-WP noch keine R290-Geräte vorhanden.

Die bessere Effizienz von S/W-WP und W/W-WP im Vergleich zu L/W-WP wird auch in Feldtests, beispielsweise der Fraunhofer Institute ISE (Solare Energiesysteme) und IBP (Bauphysik), bestätigt. Darüber hinaus zeigen die Tests eine häufig bessere Effizienz im Neubau, wobei man dies mit der üblicherweise niedrigeren Vorlauftemperatur bei den in Neubauten üblichen Flächenheizungen erklären kann. Die in Feldtests gemessenen Jahresarbeitszahlen variieren stark. Dies kann zum Teil dadurch erklärt werden, dass die tatsächlichen Betriebsbedingungen, z.B. die Konfiguration der Heizungsanlage und das Nutzerverhalten, nicht von Gerät zu Gerät vergleichbar sind. Für energieeffizienten Betrieb der Wärmepumpensysteme kommt sorgfältiger, sachgemäßer Planung und Ausführung wie auch der angemessenen Nutzung der gesamten Heizungs- und Trinkwarmwassersysteme eine wesentliche Rolle zu.

In **Kapitel 4** werden die Umweltauswirkungen von Wärmepumpen anhand einer Lebenszyklusanalyse beschrieben und verschiedene Fälle verglichen. Ziel der Analyse ist es, sowohl die umweltschädlichsten Stadien zwischen Produktion und Entsorgung im Leben einer Wärmepumpe zu identifizieren als auch verschiedene beispielhafte Modelle im Hinblick auf ihre Umweltauswirkungen zu vergleichen.

Für die Analyse wurde erst die vorhandene Literatur ausgewertet bevor eigene Berechnungen erstellt wurden. Diese beinhalten die Treibhausgasemissionen je Lebensstadium sowie die Quantifizierung weiterer Umweltauswirkungen, wie zum Beispiel Versauerung, Eutrophierung und Verbrauch von Frischwasser.

Bisherige Studien haben ergeben, dass Treibhausgasemissionen die bedeutendste Umweltauswirkung von Wärmepumpen darstellen. Treibhausgasemissionen entstehen durch den Energieverbrauch der Wärmepumpe (indirekte Emissionen) 1) bei der Gewinnung von Rohstoffen, bei Herstellung und am Lebensende sowie 2) im Betrieb, und 3) durch den Austritt von Kältemittel in die Atmosphäre (direkte Emissionen). Emissionen, die bei der Stromerzeugung für den Betrieb entstehen tragen hier mit Abstand den größten Anteil bei. Ein Emissionsreduktionspotenzial haben daher besonders eine hohe Energieeffizienz sowie Maßnahmen, die einen effizienten Betrieb sicherstellen sowie eine Umstellung der Stromproduktion auf erneuerbare Energieträger.

Während Emissionen, die bei der Gewinnung der Rohstoffe, der Herstellung und bei Recycling oder Entsorgung entstehen, nur auf zwei bis sechs Prozent geschätzt werden (Itard, 2007; Johnson, 2011; Kemna et al., 2019), wird der Beitrag von Kältemittel auf ca. 20 Prozent geschätzt (Johnson, 2011). Natürliche Kältemittel können daher einen hohen Beitrag zur Verringerung der Treibhausgasemissionen bei Wärmepumpen beitragen.

Weitere betrachtete Umweltwirkungen sind der Verbrauch von Süßwasserressourcen, gefährlicher Abfall zur Deponie, nicht gefährlicher Abfall, radioaktiver Abfall, Versauerungspotenzial, Eutrophierungspotenzial, Potenzial für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen und das Potenzial für den abiotischen Abbau fossiler Brennstoffe.

Besonders relevant ist des weiteren **Trifluoressigsäure (TFA)**, eine sehr persistente Säure ohne bekannten Abbauprozess, die für einige Organismen giftig ist. Kältemittelquellen von TFA sind vor allem Hydrofluorolefine (HFOs), die aufgrund ihres geringen Treibhauspotenzials vermehrt als Einzelsubstanz oder in Gemischen eingesetzt werden. Momentan in Wärmepumpen eingesetzte HFO-Gemische, wie R452B, R454B und R454C enthalten alle R1234yf, und sind damit Vorläufer von TFA. Da TFA im Prinzip nicht abbaubar ist, stellt jeder zusätzliche Eintrag ein Risiko für die Umwelt dar, da nicht absehbar ist, wie akkumulierte TFA in verschiedenen Ökosystemen wirken wird.

Eigene Berechnungen zu indirekten und direkten Emissionen im Betrieb wurden für verschiedene Vergleichsfälle durchgeführt. Emissionen in der Produktion und am Lebenszyklusende sowie beim Transport wurden mit Daten aus Probas und Ökobaudat ermittelt. Für die Vergleichsfälle wurde eine Heizleistung von 8 Kilowatt für ein Gebäude von 120 Quadratmetern Wohnfläche mit einem Heizenergiebedarf von 16.000 Kilowattstunden pro Jahr angenommen bei einer Lebensdauer von 15 Jahren.

Tabelle 2: Übersicht der Vergleichsfälle

Vergleichsfälle	Stadien im Lebenszyklus
L/W-WP und S/W-WP mit R290 als Kältemittel und markttypischen Kennwerten	Produktion: Wärmepumpe/Kältemittel
L/W-WP und S/W-WP mit R290 als Kältemittel hohe Effizienz	Betrieb: Wärmepumpe/Kältemittel
L/W-WP und S/W-WP mit R32 als Kältemittel und markttypischen Kennwerten	Lebenszyklusende: Wärmepumpe/Kältemittel

Im Referenzfall tragen Emissionen durch den Betrieb der WP sowohl für die L/W- als auch für die S/W-WP zu 98 Prozent zu den THG-Emissionen bei. Da R290 ein sehr geringes Treibhauspotenzial hat, sind direkte Emissionen vernachlässigbar gering. Nur bei WP mit dem Kältemittel R32 tragen sie noch 2 Prozent bei der L/W-WP und 4 Prozent bei S/W-WP zu den Gesamtemissionen bei. Bei einem erwarteten Absenken des Emissionsfaktors der Stromerzeugung durch einen höheren Anteil erneuerbarer Emissionen wächst dieser prozentuelle Anteil. Die hocheffiziente L/W-WP spart bei einer Lebensdauer von 15 Jahren insgesamt circa 14 Prozent der THG-Emissionen ein im Vergleich zum Referenzfall. Bei der hocheffizienten S/W-WP sind es über die Lebensdauer 17 Prozent. Die R32 Vergleichsfälle haben ca. 6 Prozent höhere THG-Emissionen als die R290 Referenzfälle, vor allem hervorgerufen durch Kältemittellemissionen.

Weitere Umweltauswirkungen, wie zum Beispiel das Versauerungs- oder Eutrophierungspotenzial lassen sich auch hauptsächlich der Stromerzeugung für den Betrieb der Wärmepumpe zuordnen. Wie in vorherigen Studien, wurde auch in diesen Berechnungen der Betrieb, also die Stromerzeugung, als Hauptverursacher von Treibhausgasemissionen sowie weiteren Umweltauswirkungen ermittelt. Bei Nutzung eines natürlichen Kältemittels ist die Energieeffizienz mit Abstand das wichtigste Kriterium, um die Umweltauswirkungen von Wärmepumpen zu verringern.

Zwischen Februar und August 2021 gaben Expertinnen und Experten aus der Branche in 12 Online-Interviews Rückmeldung zu möglichen Anforderungen eines Blauen Engels für Hauswärmepumpen, welche in **Kapitel 5** zusammengefasst werden. In dem natürlichen Kältemittel R290 sehen die Ansprechpartner*Ansprechpartnerinnen gute Chancen, sich auf dem Wärmepumpenmarkt stärker zu etablieren, insbesondere falls die Füllmengen auch in der

Innenaufstellung erhöht werden können und speziell dafür optimierte Komponenten verfügbarer würden. Gerade R290 sei für energieeffiziente Wärmepumpen gut geeignet. Betriebsgeräusche zu minimieren, sehen die Hersteller als wichtig an, insbesondere bei den außen aufgestellten L/W-WP, die derzeit gut abgesetzt werden. Für die umweltgerechte und ressourcenschonende Produktgestaltung gibt es Ideen wie die Reduktion von Verpackungsmaterialien, aber auch das Bewusstsein, dass ein Kältemittel möglichst umweltschonend sein sollte – sowohl was das Treibhauspotenzial angeht als auch sonstige Umweltwirkungen. Auch Anforderungen an die Handhabung von Störung und Wartungsbedarf sowie eine verlängerte Verfügbarkeit von Ersatzteilen seien sinnvoll, um effizienten Betrieb sicher zu stellen und die Lebensdauer zu maximieren.

Einige Hersteller äußerten Interesse an einem zukünftigen Blauen Engel. Gleichzeitig wurde betont, dass eine Verknüpfung mit einer finanziellen Förderung die Erfolgsaussichten deutlich erhöhen würde. Teilweise wird es (sehr) kritisch gesehen, dass ein Umweltzeichen eingeführt werden soll: Die Tatsache, dass wenige Modelle ein Umweltzeichen hätten, könne den Anschein erwecken, dass die übrigen, nicht ausgezeichneten Wärmepumpen nicht umweltfreundlich seien, obwohl sie dies gerade im Vergleich zu Öl- und Gasheizungen auch ohne ein Umweltzeichen sind.

Zusammenfassend wird in **Kapitel 6** beschrieben, dass eine umweltfreundliche Hauswärmepumpe, die zukünftig für einen Blauen Engel infrage kommen soll, mindestens die Kriterien 1) einer hohen Effizienz und 2) eines natürlichen Kältemittels erfüllen muss. Als zusätzliche Kriterien kämen noch Maßnahmen zur Geräuschreduzierung und zur Gewährleistung eines langfristig effizienten und stabilen Betriebs infrage, letzteres z.B. durch Gewährleistung von Ersatzteilverfügbarkeit und Softwareupdates, klare Empfehlungen im Benutzerhandbuch, sinnvolle Einstellmöglichkeit und Benachrichtigung der Nutzer*innen bei Störungen.

Die optimale Ausgestaltung der Anforderungen an die Energieeffizienz wird im nächsten Schritt des Projekts durch eine weitere Analyse der R290-Geräte am Markt im Rahmen der Kriterienentwicklung bestimmt.

Summary

Domestic heat pumps, i.e. heat pumps that are used in single- or multi-family homes to heat rooms or at the same time to heat water, have a key role to play in achieving the climate targets for the building sector. They can make a significant contribution to decarbonization, as they are powered by electricity that is increasingly generated from renewable sources. Nevertheless, a high level of energy efficiency in these products is particularly important in view of a forecast increase in their use. This prevents an unnecessary burden of the power grid and of course also a high use of electricity as it is not generated entirely from renewable sources.

In addition, most heat pumps still use fluorinated refrigerants, which should be avoided due to their global warming potential and atmospheric degradation products. Therefore, the German Environment Agency intends to relaunch a Blue Angel eco-label for domestic heat pumps. The use of natural refrigerants has already been established as a criterion; further criteria are being developed as part of the project “Domestic heat pumps with natural refrigerant - development of requirements for climate-friendly and energy-efficient appliances for the Blue Angel”.

This interim report provides the basis for the development of concrete criteria proposals for a future Blue Angel for the product group of domestic heat pumps. For this purpose, the current market situation and the state of the art were examined with a view to the penetration of the market with natural refrigerants. In addition, the report sheds light on further environmental impacts of heat pumps, which are related, for example, to the materials used and noise emissions.

The first chapter provides an overview of the product group "domestic heat pumps", the regulatory context and aspects relating to existing eco-labels, certifications and funding opportunities. The categorization of heat pumps is based on the heat source (outdoor air, ground or water) and heat sink (air or water) used. In addition, a distinction is made between the purpose of space heating, the preparation of domestic hot water and their combination in one device.

Natural refrigerants are in principle suitable for use in domestic heat pumps and are already in use. So far, heat pumps with the natural refrigerant R290 (propane) have been the most popular on the market. R290 is a hydrocarbon and is classified as a flammable refrigerant of safety level A3 (highly flammable) according to DIN EN 378-1. This currently leads to restrictions: A3 refrigerants may only be used indoors in small charge sizes (less than 150 grams) according to the current product safety standard DIN EN 60335-2-40, or up to 998 grams depending on the room size and height of the installation. In the case of larger charge sizes, additional technical measures, such as ventilation, are required.

Beyond the safety aspect related to the flammability of A3 refrigerants such as R290, there are other requirements related to product safety, environmental and health protection that all domestic heat pumps must meet. Here, product design is largely determined by European Union (EU) regulations and directives and their reference to harmonized standards, as well as their implementation in national laws or directives.

Important for classifying the refrigerant issue is Regulation (EU) No. 517/2014 of the European Parliament and of the Council of 16 April 2014 on fluorinated greenhouse gases and repealing Regulation (EC) No. 842/2006 (**F-gas Regulation**) (EU, 2014d), because this regulates the reduction of emissions of fluorinated greenhouse gases and will increasingly restrict the possibilities of using them in heat pumps. This does not concern natural refrigerants. On the contrary, increased use of natural refrigerants in heat pumps will contribute to achieving the objectives of the regulation (environmental protection by reducing emissions of fluorinated

greenhouse gases) if further bans on fluorinated refrigerants become possible due to the availability of suitable alternatives.

Heat pumps must continue to comply with the directives and laws relevant to electrical appliances on the use of substances (e.g. ban on lead, mercury, etc.) and on disposal. Special requirements apply to brine-to-water heat pumps (B/W-HP) and water-to-water heat pumps (W/W-HP) that use the ground or groundwater as a heat source, for which boreholes for geothermal probes or wells are drilled. Here, water and mining laws must be observed. Furthermore, certification of the drilling companies and well builders is relevant.

The EU **Ecodesign** Regulation (EU) No. 813/2013 sets out minimum efficiency and environmental performance requirements for space heating heat pumps or combi heat pumps used in combination for space heating and water heating. It also specifies how the energy efficiency for space heating and domestic hot water production is to be determined. The minimum seasonal space heating energy efficiency, for a European reference climate ("Warm" Athens, "Average" Strasbourg, "Cold" Helsinki) is:

- ▶ Space heaters and combination heaters with heat pumps, except low-temperature heat pumps: the seasonal space heating energy efficiency must not fall below 110 percent.
- ▶ Low-temperature heat pumps: seasonal space heating energy efficiency must not fall below 125 percent.

Regulation (EU) No. 811/2013 regulates the **energy labeling** of these devices.

- ▶ Low-temperature heat pumps with a seasonal space heating energy efficiency $\eta_s \geq 175$ percent receive an A+++ class label; those for medium-temperature applications receive A+++ starting at $\eta_{wh} \geq 150$ percent.
- ▶ For water heating energy efficiency for combination heaters and water heaters, classes are divided according to load profiles. In load profiles L, for example, an appliance receives class A+++ for an η_{wh} of ≥ 188 percent (EU, 2013a, 2013b).

The relevant standards are DIN EN 14511-1 to -4 on the measurement methods and conditions for the coefficient of performance in heating mode COP (Coefficient of Performance) and for the calculation of the seasonal space heating energy efficiency (η_s) or the seasonal coefficient of performance (SCOP) DIN EN 14825; or DIN EN 15879-1 for direct transmission/water heat pumps.

In the case of externally installed air-to-water heat pumps (A/W-HP), compliance with noise protection specifications is also important, as **noise emissions in** residential areas can impair health. Concrete guideline values for day and night and for different categories of residential areas are specified in the German Technical Guidelines for noise reduction, *Technische Anleitung (TA) Lärm*. The EU eco-design specifications also include a maximum sound power level for heat pumps, which must be determined and specified in accordance with EN 12102. In practice, installers must also select a suitable installation site and thus ensure that the maximum permissible noise emissions according to TA Lärm are not exceeded.

In contrast to the mandatory requirements for minimum efficiency, noise emissions and environmentally compatible product design, there are voluntary **environmental labels** such as the Blue Angel, the Nordic Swan or the European Eco-Label. All three labels were also available for heat pumps in the past; however, there is currently no voluntary eco-label (Type-1 according to DIN EN ISO 14024) for heat pumps in Europe. The corresponding Blue Angel ended in 2017, and the product group also included absorption or adsorption heat pumps powered by gas

engines. The Blue Angel set requirements in the form of Total Equivalent Warming Impact (TEWI) limits, as well as maximum noise emissions, but also for the use of high-efficiency circulation pumps and for product information for technical personnel and for the end users. In addition to the Blue Angel, until 2016 there was also an EU Ecolabel for electric, gas engine or gas absorption heat pumps, which also used the TEWI approach, but additionally allowed up to 15 percent lower efficiency when using a refrigerant with a Global Warming Potential (GWP) below 150. While the EU Ecolabel for hot water heaters is still valid, the EU Ecolabel for heat pumps (2007/742/EC) was discontinued in 2016 due to a lack of label holders. The Nordic Swan for heat pumps, which was based on the efficiency requirements of the EU Energy Efficiency Label, has also been discontinued since only one signatory was found.

In contrast, the voluntary, product-related **labels** such as Heat Pump (HP) Keymark with currently 3900 certified models and EHPA (European Heat Pump Association) Quality Label with over 6000 models are established on the European market. HP Keymark serves to verify the manufacturer's declaration and the legal requirements (ecodesign) by independent third parties, while the EHPA Quality Label additionally goes beyond the minimum legal requirements in some aspects. In addition to less common and national certifications, there is also the "SG (Smart Grid) Ready" label, which can be awarded to heat pumps that contribute to power grid load management.

In Germany, there is an optional qualification for heat pump installers according to VDI 4645 (Sachkundiger für Wärmepumpensysteme nach VDI 4645). However, if installation or maintenance requires breaking into the refrigerant circuit, certification or proof of the relevant expertise according to the F-gas-Regulation is also required. Furthermore, the electrical installation of heat pumps requires compliance with the relevant standards such as DIN EN 50220-1 (operation of electrical installations). For the certification of drilling companies for geothermal probes, the technical rule DVGW W 120-2 on qualification requirements for the fields of drilling technology and near-surface geothermal energy (geothermal probes) is relevant.

Germany promotes the installation of heat pumps as part of its federal funding for efficient buildings (Bundesförderung für effiziente Gebäude, BEG). Grants of up to 50 percent via BAFA from the BEG Individual Measures (Einzelmaßnahme, EM) program can be used for the installation of a heat pump during renovation. In addition, funding for specialist planning and construction support has also been introduced for building refurbishment. At the same time, an individual renovation roadmap (individueller Sanierungsfahrplan, iSFP) is rewarded. If an individual renovation roadmap is implemented, the intended funding rate increases by five percent for this measure.

Finally, as a possible **scope** for a Blue Angel, mass-produced electrically operated heat pumps are proposed which are used for space heating or in combination for space heating and hot water production. A maximum rated heat output of 70 kilowatts is considered as a size range.

Table 1: Scope

Feature for the delimitation of the scope	Description
Product type	Heat pumps manufactured in series with electrically driven compressors
Function	Space heating with or without water heating
Rated heat output	For A/W-HP, B/W-HP and W/W-HP up to 70 kW for heat output to water-based heating circuits (according to standard rating conditions of EN 14511-2)

The second chapter provides a market overview with a focus on Germany. Since the heat supply of private households (space heating and hot water) accounts for a large share of their final energy consumption, heat pumps are considered to play a crucial role in achieving climate targets. The use of heat pumps instead of gas or oil heating can contribute to independence from fossil fuels in the building sector, provided they are powered by electricity from renewable sources. Private households with own electricity generation from photovoltaic systems can use the electricity they produce directly to power heat pumps. In addition, heat pumps can help optimize power supply through intelligent control and by using thermal storage and electricity storage to balance different peaks in supply and demand. To get to near-zero emissions overall in the heating of buildings, the use of natural refrigerants with low or negligible GWP is essential, in addition to energy efficiency and power supply from renewable sources.

In new residential construction, heat pumps have been the leading heating technology in Germany since 2020. In the existing housing stock, on the other hand, heat pumps only have a small market share - in 2019, this was just 2.4 percent (BDEW, 2020). Sales figures have risen steadily in recent years. In 2020, 140,500 heat pumps were sold in Germany, of which 120,000 were heat pumps used for heating. Sales of these heat pumps increased by 40 percent compared with the previous year. By far the largest sales volume was for A/W-HP (95,500 units). In addition, 20,500 domestic hot water heat pumps, 20,500 B/W-HPs and 4,000 W/W-HPs were sold in 2020. 69.5 percent of the heat pumps sold had a rated heat output of less than 10 kilowatts; 26.5 percent had a rated heat output of between 10 and 20 kilowatts.

Halogenated refrigerants are currently still the most widely used. Most models use R410A (66.1 percent for A/W-HP, 70.8 percent for B/W-HP and 68.9 percent for W/W-HP). For A/W-HP, R32 is in second place, followed by R407C. For B/W-HP and W/W-HP, on the other hand, R407C is in second place, followed by R134a.

4.9 percent of A/W-HP models use R290 refrigerant; for B/W-HP, the share is 1.4 percent and for A/W-HP, 2.2 percent.

The new mixtures with hydrofluoroolefins (HFO), such as R454B and R454C are only used in less than one percent of A/W-HP models.

While it is still unclear whether blends with HFO, such as R454C, R455A or R454B will become established on the market, an increasing share of the natural refrigerant R290 is assumed to reach up to 30 percent in 2030. This estimate from a previous study for the German Environment Agency (UBA) was also confirmed by the manufacturer discussions held in this project.

In Germany, heat pumps are sold by global manufacturers from Southeast Asia as well as by numerous established manufacturers from Germany, Scandinavia and Austria. In addition to established manufacturers of conventional heating systems, which now also offer a wide range

of heat pump designs and heat output ranges, there are also companies that specialize in heat pumps or even specific designs. Furthermore, there are smaller heat pump manufacturers with smaller market shares of domestic heat pumps in Germany that offer (in some cases exclusively) heat pump systems with natural refrigerants.

The following factors were identified as influencing market development: On the one hand, the heat pump market benefits from subsidy programs for installation in new buildings and for combinations of renovation and installation of heat pumps in existing buildings. On the other hand, however, some factors represent barriers:

1. The high price of electricity means that heat pumps often cannot be operated economically compared to gas and oil heating systems. A high carbon price, which is higher than the one currently enacted and makes gas and oil in particular more expensive, as well as an abolition of the Renewable Energy Act (Erneuerbare Energien Gesetz, EEG) levy or other reductions in electricity costs, could have a positive impact on the market.
2. Capacity bottlenecks among craftspersons and uncertainty in consulting regarding the long-term operating costs and economic viability of the heat pump.

Specific barriers to growth in the market for heat pumps with flammable refrigerants are the specifications of the standards for the charge sizes and higher production costs due to built-in safety measures. In cases where an indoor installation is suitable (due to high building density and potential noise pollution of the neighbourhood), heat pumps with non-flammable refrigerants therefore still have an advantage.

In the third chapter, the technical aspects with regard to possible environmental impacts, in particular energy efficiency, refrigerants and noise emissions, are examined in more detail. First, the basic process and the various operating modes of heat pumps are explained.

The basic suitability of a refrigerant results from the vapor pressure curve as well as the normal boiling temperature and critical point. Due to thermodynamic properties, hydrocarbons are excellent refrigerants. A relatively flat vapor pressure curve for R290 compared to other refrigerants generally favors higher compressor efficiency due to lower pressure differentials and pressure ratios compared to R32, R454C or R410A. Compressors require oil to lubricate moving components for safe operation. The advantage of using hydrocarbons is their good solubility with the oil, which leads to good removal from the evaporator due to viscosity reduction. In practice, this has a positive effect on the efficiency of the heat pump.

Different charge sizes of different refrigerants are mainly determined by the densities of the liquid in the condenser for the same heat exchanger sizes or system configurations. For smaller capacities, the charge quantity per kilowatt is relatively higher. In the case of flammable hydrocarbons, a reduction in the required refrigerant quantity is particularly relevant since they are subject to increased requirements of DIN EN 378 or DIN EN 60335-2-40 for indoor installation. Other hydrocarbons (R600a, R1270) or mixtures such as R441A (propane and propene) are in principle just as suitable, but up to now R290 has primarily been used for heat pumps in household sizes.

The natural and also non-flammable refrigerant R744 (CO₂) is also suitable for use in heat pumps. High flow temperatures can be achieved well with R744, which means it is well suited for water heating. However, the high temperature glide in supercritical operation causes large temperature differences in the flow and return, which makes it difficult to use in space heating systems. It is more commonly used in large-scale applications for commercial and industrial heat supply. The use of other natural refrigerants, including ammonia (R717), water (R718) and air, is conceivable but not currently foreseeable in practice in domestic heat pumps.

The requirements for the materials used in domestic heat pumps are strongly influenced by technical requirements. These are, on the one hand, the material compatibility with the refrigerant used and the oil used, as well as the requirements for strength, stability and tightness. Since the pressure and temperature levels of the natural refrigerants (with the exception of R744) are of a similar order of magnitude to those of the fluorinated refrigerants, there is therefore no disadvantage in using the natural refrigerants.

The efficiency of HPs is largely determined by the temperatures on the heat source and heat sink side. Low heat sink temperatures (e.g. at 35°C required flow temperature for underfloor heating) and higher heat source temperatures (especially with water as heat source) lead to higher coefficients of performance. For compliance with the Ecodesign-Directive, the SCOP values are calculated (according to DIN EN 14825). They are based on laboratory measurements (according to DIN EN 14511 for space heating or DIN EN 16147 for hot water heat pumps) of the coefficients of performance at defined operating points, which are converted to SCOP by weighting according to the frequency of temperature hours per operating point. The value (η_s) is the "seasonal space heating energy efficiency"². The value is calculated from the quotient of the space heating demand met by a heater for a given heating period and the annual primary energy consumption required to meet that demand, expressed as a percentage. The value is adjusted for the contributions to account for the temperature controllers and, in the case of space heaters or combination heaters with A/W-HP or B/W-HP, the electricity consumption of the groundwater pump(s).

An analysis of the devices available on the market based on the Austrian *get* database, supplemented by some devices additionally available in Germany from the company Hautech, shows that A/W-HP with R290 and R32 have the highest efficiency values in the low-temperature range (indoor heat exchanger outlet temperature of 35°C) up to a rated heat output of 15 kilowatts. At higher power classes, R32 and R410A are at the top of the refrigerants here, with no R290 units at all yet. At an indoor heat exchanger outlet temperature of 55°C, R290 units are the most efficient up to 15 kilowatts rated heat output. The same is true for B/W-HP in the low temperature application: In the range up to 15 kilowatts, units with R290 as refrigerant are also at the top here. Here, there are many efficient HPs with the refrigerant R410A in all performance classes. At an indoor heat exchanger outlet temperature of 55°C, models with R410A or R407C are ahead with the highest efficiency values. Two R290 units also have high efficiency values here, otherwise the R290 units are more in the midfield. Above 15 kilowatts rated heat output, there are currently no B/W-HPs with R290 refrigerant available on the market. In the W/W-HP in the low temperature range, the units with R410A are the most efficient; however, there are also very efficient R290 units up to 20 kilowatts rated heat output. At an indoor heat exchanger outlet temperature of 55°C, the most efficient W/W-HPs use R410A or R407C refrigerants. R290 only achieves average values here. In the higher capacity classes above 20 kilowatts, R290 units are not yet available even among the W/W-HP.

The better efficiency of B/W-HP and W/W-HP compared to A/W-HP is also confirmed in field tests, for example by the Fraunhofer Institutes ISE (Solar Energy Systems) and IBP (Building Physics). Furthermore, the tests show an often better efficiency in new buildings, whereby this can be explained by the usually lower indoor heat exchanger outlet temperature of underfloor heating systems commonly used in new buildings. The annual performance factors measured in

² The regulations for space heaters and water heaters implementing the Ecodesign Directive aim to set requirements for placing products on the market in the EU. This gives rise to the possibility of evaluating different technologies for the applications under consideration in terms of their energy efficiency and also making them comparable with other heating technologies. For this reason, the coefficients of performance are evaluated in terms of primary energy. In the specific case, the SCOP is related to the conversion factor CC (Conversion Coefficient, equivalent to the primary energy factor). In the Ecodesign Regulations and Energy Labelling Regulations, the value for CC is fixed at 2.5 (EU, 2013c, 2013d, 2013a, 2013b). The basis for this value is Directive 2012/27/EU.

field tests vary widely. This can be explained in part by the fact that actual operating conditions, e.g., heating system configuration and user behavior, are not comparable from unit to unit. For energy-efficient operation of heat pump systems, careful, proper planning and execution as well as appropriate use of the entire heating and domestic hot water systems play an essential role.

In chapter 4, the environmental impact of heat pumps is described using a life cycle analysis and different cases are compared. The aim of the analysis is both to identify the most environmentally damaging stages between production and disposal in the life of a heat pump and to compare different exemplary models in terms of their environmental impact.

For the analysis, the existing literature was first evaluated before own calculations were made. These include greenhouse gas emissions per life stage as well as the quantification of other environmental impacts, such as acidification, eutrophication, and consumption of fresh water.

Previous studies have shown that greenhouse gas emissions are the most significant environmental impact of heat pumps. Greenhouse gas emissions are caused by the energy consumption of the heat pump (indirect emissions) 1) during the extraction of raw materials, during production and at the end of life, and 2) during operation, and 3) by the release of refrigerants into the atmosphere (direct emissions). Emissions generated during power generation for the operation of the heat pump contribute by far the largest share here. A high level of energy efficiency and measures to ensure efficient operation, as well as a switch to renewable energy sources in electricity production, therefore have a particularly high potential for reducing emissions.

While emissions resulting from raw material extraction, manufacturing, and recycling or disposal are estimated to contribute only two to six percent (Itard, 2007; Johnson, 2011; Kemna et al., 2019), this is estimated to be around 20 percent for refrigerants (Johnson, 2011). Natural refrigerants can therefore make a large contribution to reducing greenhouse gas emissions from heat pumps.

Other environmental impacts considered include the consumption of freshwater resource consumption, hazardous waste to landfill, non-hazardous waste, radioactive waste, acidification potential, eutrophication potential, potential for abiotic depletion of non-fossil resources, and potential for abiotic depletion of fossil fuels.

Of particular relevance is **trifluoroacetic acid (TFA)**, a very persistent acid with no known degradation process, which is toxic to some organisms. Refrigerant sources of TFA are mainly hydrofluoroolefins (HFOs), which are increasingly used as single substances or in mixtures due to their low global warming potential. HFO mixtures currently used in heat pumps, such as R452B, R454B and R454C, all contain the HFO R1234yf, and are thus precursors of TFA. Since TFA is basically non-degradable, any additional input poses a risk to the environment, as it is not possible to predict how accumulated TFA will act in different ecosystems.

Our own calculations of indirect and direct emissions during operation were carried out for various comparative cases. Emissions in production and at the end of the life cycle, as well as during transport, were determined using data from Probas and ÖkobaDat. For the comparative cases, a rated heat output of 8 kilowatts was assumed for a building of 120 square meters of living space with a heating energy demand of 16,000 kilowatt hours per year and a lifetime of 15 years.

Table 2: Overview of the comparison cases

Comparison cases	Stages in the life cycle
A/W-HP and B/W-HP with R290 as refrigerant and market-typical characteristic values (reference case)	Production: heat pump/refrigerant Operation: heat pump/refrigerant End of life cycle: Heat pump/refrigerant
A/W-HP and B/W-HP with R290 as refrigerant and high efficiency	
A/W-HP and B/W-HP with R32 as refrigerant and market-typical characteristic values	

In the reference case, emissions from HP operation contribute 98 percent of GHG emissions for both A/W- and B/W-HP. Since R290 has a very low global warming potential, direct emissions are negligible. Only for HPs using the refrigerant R32 they still contribute 2 percent to total emissions for A/W-HP and 4 percent for B/W HP. With an expected decrease in the emission factor of electricity generation due to a higher share of renewable emissions, this percentage increases. The high-efficiency A/W-HP saves a total of about 14 percent of GHG emissions over a 15-year lifetime compared to the reference case. For the high-efficiency B/W-HP, it is 17 percent over the lifetime. The R32 comparison cases have approximately 6 percent higher GHG emissions than the R290 reference cases, primarily caused by refrigerant emissions.

Other environmental impacts, such as the acidification or eutrophication potential, can also be attributed mainly to electricity generation for heat pump operation. As in previous studies, operation, i.e. electricity generation, was identified as the main source of greenhouse gas emissions as well as other environmental impacts in these calculations. When using a natural refrigerant, energy efficiency is by far the most important criterion for reducing the environmental impact of heat pumps.

Between February and August 2021, experts from the industry provided feedback on possible Blue Angel requirements for domestic heat pumps in 12 online interviews, which are summarized in **chapter 5**. The contact persons see good opportunities for the natural refrigerant R290 to establish itself more strongly on the heat pump market, especially if the charge sizes can also be increased in indoor installation and components optimized specifically for this purpose become available. R290 in particular is well suited for energy-efficient heat pumps. Minimizing operating noise is seen by manufacturers as important, especially for A/W-HP installed outdoors, which are currently selling well. For environmentally friendly and resource-saving product design, there are ideas such as reducing packaging materials, but also awareness that a refrigerant should be as environmentally friendly as possible - both in terms of global warming potential and other environmental impacts. Requirements for handling malfunction and maintenance needs, as well as extended availability of spare parts are also important to ensure efficient operation and maximize the lifetime of HPs.

Some manufacturers expressed interest in a future Blue Angel. At the same time, it was emphasized that a link with financial support would significantly increase the chances of success. In some cases, it is seen (very) critically that an eco-label is to be introduced: The fact that few models would have an eco-label could give the impression that the remaining, non-labeled heat pumps are not environmentally friendly. However, compared to oil and gas heating systems, heat pumps are a much better environmental choice, even without an eco-label.

Chapter 6 summarizes that an environmentally friendly domestic heat pump that is to be eligible for a Blue Angel in the future must at least meet the criteria of 1) high efficiency and 2) a natural refrigerant. Additional criteria would be measures to reduce noise and to ensure long-

term efficient and stable operation, the latter e.g. by ensuring availability of spare parts and software updates, clear recommendations in the user manual, reasonable adjustment options and notification of users in case of malfunctions.

The optimal design of the energy efficiency requirements will be determined in the next step of the project by further analysis of R290 units on the market as part of the criteria development.

1 Die Produktgruppe: Hauswärmepumpen

Der erste Teil dieser Studie beschreibt die Produktgruppe der Hauswärmepumpen, für die im Projekt „Hauswärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln“ Kriterienvorschläge für einen Blauen Engel erarbeitet werden. Als „Produktgruppe“ wird analog zur Definition in der Verordnung (EG) Nr. 66/2010 über das EU Umweltzeichen eine Reihe von Produkten verstanden, „die ähnlichen Zwecken dienen und hinsichtlich der Verwendung ähnlich sind oder ähnliche funktionelle Eigenschaften haben und hinsichtlich der Wahrnehmung durch den Verbraucher ähnlich sind“ (EU, 2010).

Im Rahmen dieser Studie werden Hauswärmepumpen betrachtet, also solche Wärmepumpen, die in Ein- oder Mehrfamilienhäusern zur Beheizung der Räume oder auch gleichzeitig der Warmwasserbereitung dienen. In der Wärmepumpe wird ein Kältemittel wie im Kältemittelkreislauf eines Kühlschranks abwechselnd verflüssigt und verdampft. Eine solche Hauswärmepumpe ist üblicherweise Teil der Heizungsanlage und wird in dieser ergänzt durch 1) eine Wärmequellenanlage (die beispielsweise der Außenluft oder dem Erdreich Energie entzieht) und 2) ein Wärmeverteils- und Speichersystem, welches dann beispielsweise erwärmtes Wasser im Heizungs- und Brauchwassersystem verteilt (zum technischen Aufbau, siehe 3.1).

Eine Wärmepumpe ist ein Gerät, das Energie mittels eines vorgegebenen Prozesses von einer Wärmequelle aufnimmt, mit Hilfe einer Antriebsenergie auf ein höheres Temperaturniveau transformiert und Energie als Nutzenergie an eine definierte Wärmesenke abgibt. Das Gerät und deren Komponenten sind hinsichtlich der Auslegung, der Ausführung und der Regelung des Prozesses auf die Erfüllung der Nutzaufgabe abgestimmt.

Gemäß Verordnung (EU) Nr. 813/2013 ist ein „Raumheizgerät mit Wärmepumpe“ ein Raumheizgerät, das zur Wärmeerzeugung Umgebungswärme aus Luft, Wasser oder Boden und/oder Abwärme nutzt. Ein solches Raumheizgerät mit Wärmepumpe kann mit einem oder mehreren Zusatzheizgeräten ausgestattet sein, die den Joule-Effekt in elektrischen Widerstandsheizelementen oder die Verbrennung von fossilen und/oder Biomasse-Brennstoffen nutzen (EU, 2013c).

Die hier betrachteten Wärmepumpen werden elektrisch betrieben. Da die thermische Energie aus der Umwelt genutzt wird, haben sie eine hohe Energieeffizienz. Durch die Entkopplung der Wärmeversorgung von fossilen Energieträgern und hohe Energieeffizienz zeichnen sich grundsätzlich alle Wärmepumpentypen und Bauformen durch klimafreundlichen Betrieb im Vergleich zu konventionellen Heizungssystemen aus.

Im Bereich der Hauswärmepumpen, d.h. vornehmlich in Haushalten genutzten Wärmepumpen, werden je nach Bauart und Funktionalität unterschiedliche Systeme eingesetzt. Hierfür wird im Folgenden eine Kategorisierung der Wärmepumpen vorgeschlagen. Es folgt eine Beschreibung der zu berücksichtigenden Normen und Gesetze, relevanter Umweltzeichen, anderer Zertifizierungen und Förderprogramme.

1.1 Kategorisierung von Hauswärmepumpen

Die marktübliche Einteilung der Wärmepumpen erfolgt primär über die Art der verwendeten Wärmequelle und der Wärmesenke. Als Wärmequelle dienen Luft, Erdreich oder Wasser, als Wärmesenke Wasser im Heizkreislauf, Brauchwarmwasser oder die Raumluft. Wärmepumpen, die Erdreich oder Wasser als Wärmequelle verwenden, werden auch zusammengefasst als erdreichgekoppelte Wärmepumpen bezeichnet.

3. **Luft/Wasser-Wärmepumpen (L/W-WP)** nutzen Luft als Wärmequelle, die Wärmesenke (Heiznutzen) ist das Wasser im Heizwasserkreislauf sowie das Trink-/Brauchwarmwasser. L/W-WP werden in den Bauformen Split-Ausführung und Monoblock (s.u.) konstruiert. Die L/W-WP ist in Deutschland die mit Abstand üblichste Hauswärmepumpe
4. **Sole/Wasser-Wärmepumpen (S/W-WP)** nutzen das Erdreich als Wärmequelle und Wasser (Heizwasserkreislauf oder Brauchwarmwasser) als Wärmesenke. Sie werden in Deutschland in der Regel innen aufgestellt³.
5. **Wasser/Wasser-Wärmepumpen (W/W-WP)** machen Wasser als Wärmequelle nutzbar (Grundwasser, Brunnenwasser, gelegentlich auch See- oder Flusswasser), um Wasser im Heizkreislauf oder als Brauchwarmwasser zu erwärmen (Wärmesenke). In der Regel handelt es sich um innen aufgestellte Geräte.
6. **Luft/Luft-Wärmepumpen (L/L-WP)** nutzen die Wärmequelle Luft und geben die Wärmeenergie direkt über einen Wärmeübertrager an die zu beheizende Raumluft als Wärmesenke ab. L/L-WP sind reine Raumheizgeräte bzw. Raumklimageräte und können im Gegensatz zu den zuvor genannten Typen nicht für Brauchwarmwasser genutzt werden. Reversible Splitklimageräte sind ebenso L/L-WP, wobei hier die Kühlung der Raumluft im Vordergrund steht.

Weitere Unterscheidungsmerkmale, die im Folgenden als Unterkategorien betrachtet werden, sind:

1. Die grundsätzliche **Bauform** als Monoblock oder in Split-Bauweise:
 - a. Monoblock: Alle kältetechnischen Komponenten befinden sich in einem Gehäuse, die Aufstellung kann innen oder außen erfolgen.
 - b. Split-Bauweise: Der Verflüssiger der Wärmepumpe befindet sich innerhalb des Gebäudes (Inneneinheit) die restlichen kältetechnischen Komponenten befinden sich in einem Gehäuse außerhalb des Gebäudes (Außeneinheit). Die Verbindung der Innen- und der Außeneinheit erfolgt über Kältemittelleitungen durch die Gebäudehülle.
2. Mögliche **Betriebsweisen**:
 - a. Nur Heizen („Heating only“)
 - b. Reversible Wärmepumpen: umschaltbar zwischen Heizen und aktivem Kühlen.
3. Primäre **Anwendung**:
 - a. Raumheizung
 - b. Brauchwasserbereitung
 - c. Kombination: Raumheizung und Warmwasserbereitung

1.2 Hauswärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln

Das Umweltbundesamt verfolgt mit dem Umweltzeichen Blauer Engel das Ziel, explizit zukunftsfähige und in allen Aspekten umweltfreundliche Produkte innerhalb einer Produktgruppe auszuzeichnen. Daher werden für den Blauen Engel für Hauswärmepumpen nur Geräte in Betracht gezogen, die ein natürliches Kältemittel nutzen. Zu den natürlichen Kältemitteln zählen insbesondere Kohlenwasserstoffe (wie Propan, R290), CO₂ (R744) und Ammoniak (R717).

Die bisher in Wärmepumpen hauptsächlich genutzten fluorierten Kältemittel sind aus verschiedenen Gründen des Umwelt- und Klimaschutzes bedenklich (zu den verschiedenen Umweltwirkungen siehe auch Kapitel 4). Die Treibhauswirkung aller fluorierten Kältemittel ist erwiesen und durch das GWP quantifizierbar. Überdies sind fluorierte Gase (F-Gase)

³ Bei S/W-WP gibt die Wärmequelle die Wärme an einen Solekreis ab, der wiederum die Wärme an den Verdampfer der Wärmepumpe überträgt. Bei Direktverdampfer Wärmepumpen findet die Wärmeübertragung direkt von der Wärmequelle an den Verdampfer statt; der Sole-Kreislauf entfällt.

energieaufwändiger bei der Herstellung, verursachen aufgrund des Fluorgehalts weitere Umweltbelastungen und müssen aufwändig entsorgt werden. Durch die Verordnung (EU) Nr. 517/2014 über fluoriierte Treibhausgase und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 842/2006 (kurz: F-Gase-Verordnung) ist zudem die stufenweise Abkehr von der Nutzung fluorierter Kältemittel festgelegt (EU, 2014d).

Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln werden bereits heute differenziert eingesetzt. Wie sich in den Absatzzahlen und neuesten technischen Entwicklungen widerspiegelt, bieten sich als natürliche Kältemittel in Hauswärmepumpen insbesondere die Kohlenwasserstoffe (vornehmlich R290) an. Für die Wärmepumpentypen L/W, S/W, und W/W existieren bereits Lösungen für Hauswärmepumpen, meist mit dem natürlichen Kältemittel R290 (siehe auch 3.2.1).

Kohlenwasserstoffe sind brennbar und werden gemäß DIN EN 378-1:2016+A1:2020 (siehe Kapitel 1.3.1.2) in die Sicherheitsgruppe A3 eingestuft. Unter Beachtung der geltenden Regeln der Technik hinsichtlich Konstruktion, Installation, Betrieb, Wartung und Entsorgung ist die Verwendung von A3-Kältemitteln jedoch möglich. Nach dem aktuellen Produktsicherheitsstandard DIN EN 60335-2-40:2014-01 können brennbare Kältemittel im Innenbereich mit geringeren Kapazitäten und einer Kältemenge-Füllmenge bis zu 152 Gramm⁴ genutzt werden (unabhängig von der Größe des Raumes); bei größeren Füllmengen sind besondere Maßnahmen wie zum Beispiel Zwangsentlüftung erforderlich (siehe Kapitel 1.3.1.2).

Daher werden Kohlenwasserstoffe derzeit noch eher in Heizungswärmepumpen kleiner Leistung und vor allem in außen aufgestellten Wärmepumpen eingesetzt. Im Außenbereich sind Füllmengen von bis zu 5 Kilogramm zulässig. Für andere Einsatzbereiche ist eine Weiterentwicklung der normativen Rahmenbedingungen (z.B. Produktstandards) förderlich, bzw. eine Weiterentwicklung der technischen Produktmerkmale (Sicherheitskonzepte bzw. Sicherheitsaspekte im Design und bei der Installation der Geräte).

Das natürliche Kältemittel R744 (CO₂) zeichnet sich aufgrund seiner thermodynamischen Eigenschaften durch hohe Leistungszahlen beim Einsatz in Brauchwasserwärmepumpen aus, wohingegen die Einsatzmöglichkeiten in Heizungswärmepumpen durch die überkritische Wärmeabgabe limitiert werden. Für CO₂-Wärmepumpen ist die Energieeffizienz bei geringeren Temperaturspreizungen, wie für die Gewinnung von Raumwärme, geringer. Sowohl R744 (CO₂) als auch R717 (Ammoniak) kommen hauptsächlich in größeren Leistungsbereichen zum Einsatz und haben derzeit wenig Relevanz für Hauswärmepumpen.

1.3 Regulative Rahmenbedingungen

Eine grundsätzliche Darstellung der wesentlichen Regularien mit Relevanz zur Produktgruppe Hauswärmepumpen ist in Tabelle 3 dargestellt.

Die oberste Ebene in der Regelhierarchie (nach einer internationalen bzw. völkerrechtlichen Ebene) ist das EU-Recht. Für EU-Mitgliedstaaten existieren mehrere Arten verbindlicher Rechtsakte. Verordnungen (Regulations) sind direkt in allen Mitgliedstaaten gültig; Richtlinien (Directives) müssen in nationales Recht umgesetzt werden. Die Umsetzung des EU-Rechts in nationales Recht kann ggf. mehrere nationale Gesetze betreffen. Beschlüsse (Decisions) sind für den Adressaten verbindlich, Empfehlungen (Recommendations) sind nicht verbindlich.

⁴ In der DIN EN 60335-2-40 wird explizit mit dem Wert 4 X LFL für m1 gerechnet, was 152 Gramm entspricht. Der Wert m1 ist in den Berechnungstabellen enthalten. Im Gegensatz dazu wird in der DIN EN 378 m1 in den Tabellen nicht genannt und pauschal mit 150 Gramm gerechnet

Nationale Gesetze setzen die EU-Rechtsakte um bzw. ergänzen diese. Die Gesetze decken zum Teil einen sehr weiten Bereich ab, durch Verordnungen kann eine Konkretisierung für bestimmte Anwendungsbereiche oder Produktgruppen geschaffen werden.

In Ländern mit föderaler Struktur sind neben der nationalen Gesetzgebung auch die Gesetze der Bundesländer (bzw. Kantone, Provinzen o.ä.) zu berücksichtigen. Geothermische Anwendungen von Wärmepumpen (Erdwärmekollektoren mit Sole) können betroffen sein (Wasser- und Bergrecht), aber auch L/W-WP mit Hinblick auf den Lärmschutz. Der Einsatz natürlicher Kältemittel (speziell in Bezug auf die Brennbarkeit) unterliegt u.a. ggf. auch baurechtlichen Anforderungen.

Normen - dies umfasst technische Normen der Normungsorganisationen (DIN, VDE, VDI und deren europäischer bzw. internationaler Entsprechung) und auch Richtlinien der Gesetzlichen Unfallversicherung sowie Regeln zum Arbeits- und Gesundheitsschutz (bspw. die Technischen Regeln für Betriebssicherheit, kurz TRBS, oder Technischen Regeln Gefahrstoffe, kurz TRGS) - sind nicht grundsätzlich verpflichtend anzuwenden, es sei denn, dies ist in einem Gesetz explizit erwähnt. Sie konkretisieren ggf. die Anforderungen der Gesetze und liefern Vorgaben und Vorschläge zur Einhaltung der Gesetze. In vielen Fällen ist zwar die Einhaltung der Normen nicht vorgeschrieben, es gilt aber die Konformitätsvermutung bei Erfüllung der Normen. Eine Einhaltung der Normen ist daher zu empfehlen.

Nach der Verordnung (EU) Nr. 1025/2012 ist eine harmonisierte Norm: „eine europäische Norm, die auf der Grundlage eines Auftrags der Kommission zur Durchführung von Harmonisierungsrechtsvorschriften der Union angenommen wurde“ (EU, 2012b). Die Nationalen Verordnungen verweisen in der Regel auf die harmonisierten EU-Normen.

Kategorien von Regularien für den Einsatz von Hauswärmepumpen

Als Basis eines EU-Rechtstaktes wird üblicherweise ein Schutzziel definiert. Für die Produktgruppe Hauswärmepumpen können folgenden Schutzziele zur Kategorisierung betrachtet werden:

1. Verbraucherschutz
2. Produktsicherheit
3. Umweltschutz
4. Arbeitsschutz/ Gesundheitsschutz („Occupational Health and Safety“)

Tabelle 3 zeigt einen Überblick von Regularien mit Relevanz für Hauswärmepumpen eingeteilt in die genannten Kategorien. Anschließend werden die wichtigsten Regularien mit Relevanz zur umweltgerechten Produktgestaltung von Hauswärmepumpen bzw. deren Zusammenspiel erläutert; diese sind in der Tabelle fett hervorgehoben.

Tabelle 3: Überblick wesentlicher Regularien mit Relevanz zur Produktgruppe

	Produktsicherheit	Umweltschutz	Arbeits-/Gesundheitsschutz
Europäische Verordnungen und Richtlinien	Akkreditierung und Marktüberwachung (CE-Kennzeichnung): Verordnung (EG) Nr. 765/2008 ▪ Allgemeine Produktsicherheit: Richtlinie 2001/95/EG ▪ „Niederspannungsrichtlinie“: Richtlinie 2014/35/EU ▪ „Maschinenrichtlinie“: Richtlinie 2006/42/EG ▪ „Druckgeräte richtlinie“: Richtlinie 2014/68/EU	Umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte („Ökodesign“/ErP Richtlinie): Richtlinie 2009/125/EG ▪ Ökodesign Raumheizgeräte und Kombiheizgeräte: Verordnung (EU) 813/2013 ▪ Ökodesign Warmwasserbereiter: Verordnung (EU) 814/2013 ▪ Energieverbrauchskennzeichnung: Verordnung (EU) 2017/1369 ▪ Energiekennzeichnung Raumheizgeräte und Kombiheizgeräte: Delegierte Verordnung (EU) Nr. 811/213 ▪ Energieeffizienzkennzeichnung Warmwasserbereiter: Delegierte Verordnung (EU) Nr. 812/2013 ▪ Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen („CLP-Verordnung“): Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 ▪ Gefährliche Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten („ROHS-Richtlinie“): Richtlinie 2011/65/EU ▪ Elektro- und Elektronik-Altgeräte („WEEE-Richtlinie“): Richtlinie 2012/19/EU ▪ Fluorierte Treibhausgase („F-Gase Verordnung“): Verordnung (EU) Nr. 517/2014 ▪ Wasserrahmenrichtlinie: Richtlinie 2000/60/EG ▪ Luftqualität und saubere Luft: Richtlinie 2008/50/EG ▪ Erneuerbare Energien: Richtlinie (EU) 2018/2001 ▪ Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden: Richtlinie 2010/31/EU	▪ Sicherheit und Gesundheitsschutz der Arbeitnehmer: Richtlinie 89/391/EWG ▪ Sicherheit und Gesundheitsschutz in Arbeitsstätten: Richtlinie 89/654/EWG
Nationale Gesetze	▪ Produktsicherheitsgesetz (ProdSG) ▪ Chemikaliengesetz (ChemG)	▪ Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz (EVPG) ▪ Energieverbrauchskennzeichnungsgesetz (EnVKG) ▪ Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) ▪ Elektroggesetz (ElektroG) ▪ Bundesberggesetz (BbergG) ▪ Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) ▪ Gebäudeenergiegesetz (GEG)	▪ Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG) ▪ Sozialgesetzbuch (SGB)
Nationale Verordnungen	Verordnungen zum Produktsicherheitsgesetz (ProdSV)	▪ Elektro- und Elektronikgeräte-Stoff-Verordnung (ElektroStoffV) ▪ Gefahrstoffverordnung (GefStoffV)	▪ Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV)

	Produktsicherheit	Umweltschutz	Arbeits-/Gesundheitsschutz
	1. ProdSV (elektrische Betriebsmittel) 9. ProdSV (Maschinenverordnung) 14. ProdSV (Druckgeräteverordnung)	Chemikalien-Klimaschutzverordnung (ChemKlimaschutzV)	Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV)
Verordnungen auf Bundesland-Ebene, z.B. im Umweltrecht: Landes-Immissionsschutzgesetz (LImSchG), Landeswassergesetz (LWG) etc.			
Normen, Richtlinien	- DIN EN 60335-Reihe - DIN EN ISO 12100 - DIN EN 378-1 bis -4 - DIN EN ISO 13585	- DIN EN 14511, DIN EN 14825, DIN EN 16147 - DIN EN 12102 - Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm) - Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) - Technischen Regeln Gefahrstoffe (TRGS) - Technische Regeln der Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V (DWA), Regeln des Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) - VDI 4640, DVGW Arbeitsblatt W120	- Technischen Regeln Gefahrstoffe (TRGS) - Technische Regeln Arbeitsstätten (ASR) - Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung DGUV-Regel 100-500

1.3.1 Verbraucherschutz, Produktsicherheit und Arbeits-/Gesundheitsschutz

1.3.1.1 Gesetzliche Regelungen

Die **CE-Kennzeichnung** ist die Voraussetzung für das Inverkehrbringen von Waren in der EU. Sie basiert auf *Verordnung (EG) 765/2008 über die Vorschriften für die Akkreditierung und Marktüberwachung im Zusammenhang mit der Vermarktung von Produkten* und wird nur auf Produkten angebracht, „für die spezifische Harmonisierungsrechtsvorschriften der Gemeinschaft deren Anbringung vorschreiben“ (EU, 2008b). Im Fall von Wärmepumpen sind dies z.B. die Produktsicherheitsverordnungen wie die Niederspannungsrichtlinie (EU, 2014b), die Maschinenverordnung (EU, 2006) oder im Falle von Wärmepumpen mit Fluorkohlenwasserstoffen Kältemitteln auch die F-Gase-Verordnung (EU, 2014d) (alle werden im Folgenden näher beschrieben).

Ist ein Produkt mit der CE Kennzeichnung versehen, wird generell angenommen, dass die Einhaltung von Regularien, die Verbraucherschutz, Produktsicherheit und Arbeitsschutz/Gesundheitsschutz betreffen gegeben ist. Der Hersteller dokumentiert in eigener Verantwortung, dass sein Produkt alle Anforderungen der geltenden Rechtsvorschriften(en) erfüllt. Dies kann auf der Grundlage von harmonisierten Normen geschehen, es können aber auch andere Normen oder Dokumente verwendet werden, wenn der Hersteller damit die Konformität bestätigen kann. Der Hersteller muss eine Konformitätsbewertung durchführen, eine technische Dokumentation erstellen, eine EU-Konformitätserklärung ausstellen, gegebenenfalls eine Betriebsanleitung bereitstellen und die CE-Kennzeichnung an seinem Produkt anbringen (EU, 2008b, 2008a).

Die Konformitätserklärung enthält eine Liste aller europäischer Richtlinien und Verordnungen, mit denen das Produkt übereinstimmt. Die wichtigsten werden in den folgenden Kapiteln genannt. Des Weiteren werden alle Normen genannt, die angewandt worden. Hierbei werden harmonisierte Normen extra angegeben.

Die Anforderungen an Hauswärmepumpen, die durch die CE Kennzeichnung entstehen werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

Produktsicherheit

Produkte, die auf den europäischen Markt gebracht werden, müssen bestimmte Anforderungen an ihre Sicherheit erfüllen. Primärer Adressat der relevanten Gesetzgebung ist der Hersteller der Produkte, er hat die Konformität der Produkte (die „Sicherheit“) auf Basis einer Risikobewertung sicherzustellen. Die Europäische Richtlinie (2001/95/EG) zur **allgemeinen Produktsicherheit** (EG, 2002) ist im Produktsicherheitsgesetz (ProdSG) umgesetzt. Verschiedene weitere Europäische Richtlinien detaillieren die Anforderungen und sind in den Verordnungen zum ProdSG umgesetzt (ProdSV). Wesentliche ProdSV, die einen Bezug zur Wärmepumpe und den verwendeten Kältemitteln haben, sind:

1. ProdSV: „Verordnung über elektrische Betriebsmittel (Niederspannungsrichtlinie)“ (Umsetzung der Richtlinie 2014/35/EU (EU, 2014b), kurz „LVD“ für „Low voltage directive“). Hauswärmepumpen fallen in den meisten Fällen unter diese Verordnung basierend auf ihrem Hauptverwendungszweck. Konformität mit der Verordnung ist gegeben, wenn harmonisierte Normen gemäß Mitteilung 2018/C 326/02 (EU, 2018b) und dem Durchführungsbeschluss (EU) 2019/1956 (EU, 2019a) sowie deren Ergänzungen⁵ in der Prüfung der Produktsicherheit angewandt wurden. Relevant sind hier DIN EN 60335-1 (Sicherheit elektrischer Geräte für den

⁵ Übersicht zu harmonisierten Normen und Dokumenten zur LVD siehe auch https://ec.europa.eu/growth/single-market/european-standards/harmonised-standards/low-voltage-lvd_en (Europäische Kommission, o. J.-a)

Hausgebrauch und ähnliche Zwecke), besonders die DIN EN 60335-2-40 (Erläuterung siehe Kapitel 1.3.1.2).

- a) **Die 9. ProdSV „Maschinenverordnung“** (Umsetzung der Richtlinie 2006/42/EG (EU, 2006), kurz „MD“ für „Machine Directive“) ist relevant für Wärmepumpen, die für industrielle und gewerbliche Zwecke und nicht für den Haushaltsgebrauch gedacht sind. Die Konformität wird entweder nach der LVD oder der MD erklärt. Konformität mit der Verordnung ist gegeben, wenn harmonisierte Normen (gemäß Mitteilung 2018/C 092/01 (EU, 2018a) und dem Durchführungsbeschluss (EU) 2019/436 (EU, 2019b) sowie den zugehörigen Ergänzungen⁶) in der Prüfung der Produktsicherheit angewandt wurden. Mit besonderer Relevanz für Wärmepumpen sind die DIN EN ISO 12100: *Sicherheit von Maschinen - Allgemeine Gestaltungsgrundsätze - Risikobeurteilung und Risikominderung, die DIN EN 378-2: Kälteanlagen und Wärmepumpen - Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen - Teil 2: Konstruktion, Herstellung, Prüfung, Kennzeichnung und Dokumentation* und die DIN EN 60335 Normenreihe. Wenn brennbare Kältemittel eingesetzt werden, erhöhen sich die Anforderungen an die Sicherheit von Wärmepumpen unter dieser Verordnung. Die Hersteller müssen nun sicherstellen, dass durch das Design der Wärmepumpen keine Risiken entstehen, z.B. durch Leckage von brennbaren Substanzen in oder außerhalb des Gerätes. Die Interpretation und Umsetzung ist den Herstellern überlassen.
- b) **Die 14. ProdSV „Druckgeräteverordnung“** (Umsetzung der Richtlinie 2014/68/EU (EU, 2014c), kurz „PED“ für „Pressure Equipment Directive“) ist relevant für alle Wärmepumpen. Dort werden Fluide in 2 Gruppen unterteilt; Gruppe 1 umfasst u.a. brennbare Gase und stellt erhöhte Anforderungen bei deren Einsatz. Aufgrund der Drucklage gelten auch beim Einsatz von Hochdruckkältemitteln (R744) erhöhte Anforderungen. Bei diesen erhöhten Anforderungen handelt es sich zum Beispiel um umfangreichere Konformitätsbewertungsverfahren wie etwa die Durchführung einer Baumusterprüfung. Konformität mit der Verordnung ist gegeben, wenn harmonisierte Normen gemäß Mitteilung 2018/C 326/03 (EU, 2018b) in der Prüfung der Produktsicherheit angewandt wurden. Mit besonderer Relevanz für Wärmepumpen sind hier die DIN EN 378-2 und die DIN EN ISO 13585: *Hartlöten - Prüfung von Hartlötern und Bedienern von Hartlöteinrichtungen*.

Arbeits- und Gesundheitsschutz

Der Arbeitsschutz ist eines der wesentlichen Schutzziele und u.a. in Europäischen Regularien wie den Richtlinien 89/391/EWG („Gesundheitsschutz bei der Arbeit“) und 89/654/EWG („Betriebssicherheit“) geregelt. Die Anforderungen richten sich an Arbeitgeber und Anlagenbetreiber. Für Hauswärmepumpen ist der Sachverhalt bei größeren Leistungen für Mehrfamilienhäuser bzw. gewerblicher Nutzung (z.B. Vermietung, Geschäftsräume etc.) zu berücksichtigen.

Im deutschen Recht sind diese im Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG) und durch die Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) und Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) umgesetzt. Technische Regeln (ASR: Technische Regeln Arbeitsstätten und TRBS: Technische Regeln Betriebssicherheit) regeln die Durchführung der Verordnungen. Die BetrSichV und auch die ArbStättV beziehen sich auch auf das ProdSG, indem überwachungsbedürftige Anlagen definiert sind (§2 Nummer 30 „Leitungen unter innerem Überdruck für brennbare, ätzende oder giftige Gase, Dämpfe oder Flüssigkeiten“ betrifft u.a. Kälteanlagen und Wärmepumpen mit

⁶ Übersicht zu harmonisierten Normen und Dokumenten zur MD siehe auch: https://ec.europa.eu/growth/single-market/european-standards/harmonised-standards/machinery-md_en (Europäische Kommission, o. J.-b)

brennbaren Kältemitteln). Das bedeutet, dass beim Einsatz einer Wärmepumpe mit brennbaren Kältemitteln, ein Arbeitgeber unter Umständen zusätzliche Maßnahmen zur regelmäßigen Inspektion sowie Schulung und Unterweisung der Mitarbeiter*innen ergreifen muss.

Parallel sind in solchen Fällen auch die Regeln der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) zu berücksichtigen. Für Kälteanlagen und Wärmepumpen gilt die DGUV-Regel 100-500 „Betreiben von Arbeitsmitteln“ Kap. 2.35 „Betreiben von Kälteanlagen, Wärmepumpen und Kühleinrichtungen“. Die aktuelle Version stammt aus dem Jahr 2005 und entspricht hinsichtlich des Einsatzes brennbarer Kältemittel technisch und normativ nicht mehr dem Stand der Dinge. Sie verlangt beispielsweise, dass der Arbeitgeber zusätzliche Maßnahmen zur Kennzeichnung durchführen muss bzw. Sicherheitsbereiche einrichten, die in dem Umfang für Wärmepumpen nach den aktuellen Sicherheitsstandards nicht zwingend erforderlich sind.

Auch die Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) regelt den Einsatz gefährlicher Stoffe im betrieblichen (gewerblichen) Umfeld (nicht für private Haushalte). Die Technischen Regeln Gefahrstoffe (TRGS) ergänzen und detaillieren die Anforderungen der Verordnung. Die TRGS sind zum Teil inhaltlich deckungsgleich mit bestimmten Regeln zur Betriebssicherheit.

1.3.1.2 Normen

Die folgenden Standards sind für die Produktsicherheit von Hauswärmepumpen von besonderer Relevanz. Hierbei werden vertikale und horizontale Standards unterschieden. Horizontale Standards haben keinen Bezug auf ein spezielles Produkt, während vertikale Standards produktbezogen sind. Im Fall der hier relevanten Normen DIN EN 378 und DIN EN 60335-2-40 weist die horizontale Norm DIN EN 378 darauf hin, dass für Produkte, die unter die Produktfamiliennormen fallen, letztere Vorrang haben. Im Folgenden werden die für Wärmepumpen relevanten Inhalte vor allem des produktbezogenen Standards näher erläutert.

DIN EN 60335-2-40:2014-01: Sicherheit elektrischer Geräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke - Teil 2-40: Besondere Anforderungen für elektrische Wärmepumpen, Klimageräte und Luftentfeuchter.

Die DIN EN 60335-Reihe betrifft „Elektrische Geräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke – Sicherheit“ und gilt somit für Klimageräte und Wärmepumpen für den Einsatz in (Büro-) Gebäuden und Wohnungen, nicht aber für industrielle Anwendungen. Sie enthält spezifisch für Wärmepumpen mit brennbaren Kältemitteln Informationen zu maximal einsetzbaren Kältemittelmengen, Drucktests, Anforderungen an Betriebsanleitungen, Beschriftungen der Anlage und das Vermeiden von Zündquellen im Produktdesign.

Die maximale Kältemittelmenge, die Anforderungen an eine potenzielle Belüftung und die Anforderungen an die Sekundärkreise sind von besonderem Interesse für die Aufstellung und Sicherheitsvorkehrungen für Wärmepumpen mit Propan als Kältemittel; dies wird in Anhang GG der Norm beschrieben.

Ohne Anforderungen an die Raumgröße gilt ein Füllmengen-Grenzwert von 152 Gramm Propan (basierend auf 4 x LFL (untere Explosionsgrenze – Lower Flammability Level)⁷).

Bei einer Innenaufstellung und für größere Füllmengen wird eine Formel eingesetzt, die die Menge des Kältemittels in Abhängigkeit des Raumvolumens, der Entflammbarkeit des Kältemittels und der Höhe der Aufstellung bzw. Aufhängung berechnet. Die maximale Füllmenge ist auf 26 x LFL begrenzt, was bei Propan 998 Gramm entspricht.

$$A_{\min} = (m / (2.5 \times \text{LFL}^{(5/4)} \times h_0))^2$$

7 LFL von Propan: 0.038 kg/m³ (DIN EN 60335-2-40)

$A_{\min}$: Mindestraumgröße

m: Kältemittelmenge

h_0 : Überlaufhöhe (Installationshöhe)

Ist die Wärmepumpe in einem Raum mit Zwangsentlüftung installiert, ist eine Kältemittelmenge von bis zu 130 x LFL möglich. Im Fall von Propan liegt dies knapp unter 5 Kilogramm.

Zwangsentlüftung bedeutet, dass die Luft durch einen Lüftungskanal nach draußen gezogen wird. Im Fall eines Lecks wird das Kältemittel so schnell entfernt, dass sich keine brennbaren Mischungen bilden können.

Bei einer Außenaufstellung ist ebenfalls eine Füllmenge von bis zu 130 x LFL möglich. Größere Füllmengen sind in diesem Standard nicht vorgesehen, aber möglich, wenn EN 378 angewandt würde.

Der Standard schreibt vor, dass die Anlage mit einem Warnsymbol (Entflammbares Gas) ausgestattet ist.

DIN EN 378-1:2016+A1:2020: „Kälteanlagen und Wärmepumpen - Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen“

Die DIN EN 378 ist die zentrale europäische Norm, die in vier Teilen den gesamten Lebenszyklus von Kälteanlagen und Wärmepumpen abdeckt. Sie umfasst die Planung, den Bau, die Installation, den Betrieb, die Wartung und Reparatur bis hin zur Stilllegung und Entsorgung. Sicherheitseinstufung und Informationen zu den Kältemitteln sind im Standard ebenfalls dargestellt. Mit der DIN EN 378 ist eine große Familie von Detailnormen für viele Aspekte und Komponenten verbunden (z. B. Kompressoren, Rohrleitungen, Armaturen, Sicherheitseinrichtungen, Dichtheit, Kompetenz).

Besonders relevant für Wärmepumpen sind auch hier maximale Kältemittelfüllmengen. Ebenso wie in DIN EN 60335-2-40 gibt es keine Anforderungen an die Aufstellung, wenn die Füllmenge Propan kleiner ist als 150 Gramm. Für größere Kältemittelfüllmengen von flammbaren Kältemitteln gelten Anforderungen an Räume oder Aufstellungsorte bzw. minimale Raumgrößen, ggf. mit zusätzlichen Sicherheitsanforderungen wie z.B. einer Zwangsentlüftung. Für Hauswärmepumpen mit dem Kältemittel Propan sind diese in Tabelle 4 für den Bereich „Menschlicher Komfort“ dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Raumgröße bei der Innenaufstellung ein stark limitierender Faktor ist. Bei einer Aufstellung am Boden oder in einem Meter Höhe sind bei nur 200 Gramm Propan Füllmenge schon 63 bzw. 23 Quadratmeter minimale Raumgröße notwendig. In den allermeisten Wohngebäuden ist dies nicht möglich. Bei 500 Gramm, welche für die meisten Anwendungen für Hauswärmepumpen nicht ausreichen, sind es schon 395 bzw. 142 Quadratmeter und selbst eine Anbringung in 2,2 Meter Höhe erfordert noch eine Raumgröße von 29 Quadratmetern. Die Norm erlaubt Abweichungen von der maximalen Kältemittelfüllmenge, wenn durch eine Risikobeurteilung ein gleichwertiges Sicherheitsniveau nachgewiesen wird.

Die DIN EN 378 lässt keine Füllmengen von Propan größer als 5 Kilogramm bzw. 10 Kilogramm (siehe Tabelle 2) in der Außenaufstellung zu.

Tabelle 4: Grenzwerte für die Kältemittel-Füllmenge nach DIN EN 378 im Anwendungsbereich „Menschlicher Komfort“ am Beispiel Propan bei Hauswärmepumpen

Kategorie des Zugangsbereichs	Aufstellungsort-Klassifikation			
	I: Im Personen-Aufenthaltsbereich	II: Verdichter/ Druckbehälter im Maschinenraum	III: Im Maschinenraum oder im Freien	IV: Belüftetes Gehäuse
a: Allgemeiner Zugangsbereich (Bsp.: Wohnungen, Hotels, Restaurants, Supermärkte etc.)	≤ 988 g		≤ 5 kg	≤ 4,94 kg
b: Überwachter Zugangsbereich (Bsp.: Büro- oder Geschäftsgebäude, Räume für Fabrikations- und Arbeitszwecke)	≤ 988 g		≤ 10 kg	≤ 4,94 kg

Quelle: HEAT GmbH, basierend auf DIN EN 378-1:2016+A1:2020 Anhang C.2

Für Produzenten relevant sind Detailanforderungen für die Auslegung, Konstruktion und Installation von Kälteanlagen, einschließlich Rohrleitungen, Komponenten und Materialien, sowie Anforderungen für die Prüfung, Inbetriebnahme, Kennzeichnung und Dokumentation.

Installateure finden Informationen zu Sicherheitsanforderungen an den Standort der Kälteanlage und ihrer Komponenten, sowie Detailanforderungen für elektrische Anlagen und Sicherheitseinrichtungen und Anforderungen an die persönliche Schutzausrüstung.

Für Installateure und Betreiber relevant sind Anforderungen für Betrieb, Wartung und Reparatur von Kälteanlagen sowie Rückgewinnung, Wiederverwendung und Entsorgung aller Arten von Kältemitteln, Verdichterölen und Wärmeträgerflüssigkeiten.

1.3.2 Umweltschutz

Zahlreiche Regularien dienen dem Schutz der Umwelt und des Menschen. Diese betreffen unter anderem die Gefährdung der Umwelt durch direkte Emissionen aus Produkten, verwendete Materialien oder indirekte Emissionen durch den Verbrauch fossiler Ressourcen. Diese Emissionen können stofflicher Art sein (bspw. Kältemittel, Öl oder CO₂ durch den Energieverbrauch) oder auch Lärm, Schmutz (z. B. bei der Entsorgung) und Strahlung. Die Umweltgesetzgebung ist für alle Lebensphasen der Wärmepumpen zu berücksichtigen (siehe auch Kapitel 3 und 4). Regularien mit besonderer Relevanz für die Umweltwirkungen von Hauswärmepumpen (z.B. Emissionen von Kältemitteln mit Treibhauspotenzial, Energieverbrauch, Lärmbelastung) werden in den folgenden Unterkapiteln näher beschrieben.

1.3.2.1 Kältemittel

Wärmepumpen können zurzeit sowohl mit HFKW als auch mit natürlichen Substanzen wie Propan oder CO₂ als Kältemittel betrieben werden. Früher wurden auch FCKW (vollhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe) und HFCKW (teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe) eingesetzt, diese sind jedoch aufgrund ihres hohen Ozonabbaupotenzials und infolge internationaler Bemühungen unter dem Montrealer Protokoll zum Schutz der Ozonschicht verboten. Eine Übersicht über die Kältemiteleigenschaften gibt Tabelle 20 in Kapitel 3. Die heute weit verbreiteten voll- (FKW) und teilfluorierten Kohlenwasserstoffe (HFKW) unterliegen Einschränkungen aufgrund ihres Treibhauspotenzials. Die EU hat das sogenannte „Kigali Amendment“ des Montrealer Protokolls ratifiziert, welches eine stufenweise Reduzierung der

Nutzung von teilfluorierten Kohlenwasserstoffen bis zu einem jährlichen Restverbrauch von 15 Prozent (im Vergleich zu 2019) in den entwickelten Staaten vorsieht.

Durch die **F-Gas-Verordnung** (EU, 2014d) sollen die Emissionen fluorierter Treibhausgase EU-weit gesenkt werden. Dies wird durch die folgenden Mechanismen erreicht.

- ▶ **Eine stufenweise Verknappung von HFKW** auf dem europäischen Markt auf 21 Prozent der Referenzmenge (Basis sind die Jahre 2009-2012) bis 2030. Dies ist für Hauswärmepumpen relevant, da insbesondere Kältemittel mit hohen GWP-Werten weniger verfügbar und teurer werden.
- ▶ **Verbote von bestimmten HFKW in neuen Geräten**, wo es klimafreundliche Alternativen gibt. Für Wärmepumpen gibt es momentan keine Verbote. Um den Phase-Down in der EU zu beschleunigen, hat das Umweltbundesamt vorgeschlagen, ein Verbot von Kältemitteln mit einem GWP von mehr als 150 für Hauswärmepumpen in die Überarbeitung der F-Gas-Verordnung aufzunehmen, da Alternativen, z.B. mit natürlichen Kältemitteln oder HFKW mit geringerem GWP nun am Markt verfügbar sind (Umweltbundesamt, 2021b).
- ▶ **Dichtheitskontrollen** von Anlagen, die HFKW enthalten. Ab einer Menge von fünf Tonnen CO₂-Äquivalenten muss dies mind. einmal pro Jahr durchgeführt werden. Für Wärmepumpen ist dies nur bei größeren Anlagen von Relevanz bzw. bei Kältemitteln, die noch ein hohes GWP haben wie R407C oder R410A.
- ▶ Durch die **Rückgewinnungspflicht** müssen Gase durch zertifizierte Personen aus den Anlagen geholt werden, mit dem Ziel, diese zu recyceln oder zu zerstören.

In Deutschland wird die F-Gas-Verordnung durch die *Verordnung zum Schutz des Klimas vor Veränderungen durch den Eintrag bestimmter fluorierter Treibhausgase* (Chemikalien-Klimaschutzverordnung, kurz ChemKlimaschutzV) ergänzt. Diese konkretisiert beispielsweise, welche zuständigen Stellen in Deutschland zur Abnahme von Prüfungen und Erteilung von Sachkundebescheinigungen berechtigt sind und ergänzt, dass nach F-Gase-Verordnung kennzeichnungspflichtige Erzeugnisse oder Einrichtungen, die für den Einsatz in Deutschland vorgesehen sind, auch Bedienungsanleitungen und die nach F-Gase-Verordnung erforderlichen Informationen in deutscher Sprache enthalten.

Natürliche Kältemittel fallen nicht unter die F-Gas-Verordnung. Der verstärkte Einsatz natürlicher Kältemittel kann jedoch einen wesentlichen Beitrag zum Erreichen der Ziele der Verordnung (Umweltschutz durch Minderung der Emissionen von fluorierten Treibhausgasen) leisten, wenn durch die Verfügbarkeit geeigneter Alternativen weitere Verbote von fluorierten Kältemitteln möglich werden.

Wärmepumpen müssen entsprechend der F-Gas-Verordnung mit der Information gekennzeichnet sein, welches fluorierte Kältemittel sie enthalten, welche Menge sie (in Kilogramm) enthalten und welcher Menge CO₂-Äquivalenten (in Tonnen) das entspricht. Auch bei leer in den Verkehr gebrachten Anlagen müssen die Hersteller deklarieren, für welches Kältemittel das Gerät vorgesehen ist. Die Anordnung verschiedener Kennzeichnungselemente ist in der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 (CLP-Verordnung; CLP für Classification, Labelling and Packaging), festgelegt, welche auch die Nutzung der Piktogramme und Gefahrenhinweise aus dem Global Harmonised Standard (GHS) der Vereinten Nationen für Gase unter Druck und entzündbare Gase vorgibt (EU, 2008a).

1.3.2.2 Materialien

Die **Richtlinie 2011/65/EU (ROHS-Richtlinie)**, ROHS für Restriction of Hazardous Substances) beschränkt die Verwendung bestimmter Stoffe in Elektrogeräten (national umgesetzt durch ElektroStoffV): verboten (mit zulässigen Höchstkonzentrationen) ist die Verwendung von Blei, Quecksilber, Cadmium, sechswertigem Chrom, polybromierten Biphenylen (PBB) und polybromierten Diphenylether (PBDE) (EU, 2011).

1.3.2.3 Entsorgung der Geräte

Entsprechend der **Richtlinie 2012/19/EU (WEEE-Richtlinie)**, WEEE für Waste of Electrical and Electronic Equipment), umgesetzt durch das ElektroG, dürfen Hauswärmepumpen wie andere Elektrogeräte auch, nicht im normalen Hausmüll entsorgt werden und müssen mit einem entsprechenden Symbol (durchgestrichene Abfalltonne auf Rädern) sichtbar, erkennbar und dauerhaft gekennzeichnet sein (EU, 2012).

1.3.2.4 Wasserschutz und Bergrecht

S/W-WP und W/W-WP nutzen Erdwärme bzw. Grundwasser und sind mit Bohrungen für Erdwärmesonden oder Brunnen oder mit Erdarbeiten zum Verlegen von Flächenkollektoren verbunden. Daher müssen Wasser- und Bergbaurecht beachtet werden.

Als Grundwasserbenutzung gilt nach Wasserhaushaltsgesetz (WHG) die direkte Nutzung des Grundwassers als Wärmequelle (d.h. bei W/W-WP) und in vielen Fällen auch die Nutzung durch indirekte Systeme (S/W-WP). Je nach Kollektorart (Flächenkollektor oder Tiefenbohrung) sind die Geothermieanlagen genehmigungsfrei, anzeige- oder genehmigungspflichtig.

Die Geothermie unterliegt auch dem Bergrecht, maßgeblich ist das BbergG. Die meisten Anlagen sind gemäß Bergrecht nicht genehmigungspflichtig. Bei Nutzung der Geothermie über Grundstücksgrenzen hinweg oder bei Bohrungen von mehr als 100 Meter Tiefe sind die Anlagen genehmigungspflichtig.

Aus normativer Sicht sind die VDI 4640 „Thermische Nutzung des Untergrunds“ und das DVGW Arbeitsblatt W120 zur Qualifizierung von Brunnenbauern relevant (siehe auch Kapitel 1.4.3).

1.3.2.5 Geräuschbelastung

Die Europäische Verordnung zur Luftreinhaltung (2008/50/EG) ist in Deutschland u.a. durch das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) umgesetzt. Darunter fällt auch der Lärmschutz, der in der Sechsten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum BImSchG (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm) konkretisiert wird. Die darin enthaltenen Vorgaben haben besondere Relevanz beim Einsatz von außen aufgestellten L/W-WP, deren Bauweise mit großen Ventilatoren tendenziell lautere Geräusche verursachen, als S/W-WP und W/W-WP (siehe Kapitel 3.4). Die TA Lärm legt fest, wie und wo die Geräuschimmissionen gemessen werden, und gibt Richtwerte vor. Die Maßeinheit für den Schalldruckpegel ist dB(A), wobei dB für Dezibel und (A) für international genormten Frequenzbewertungskurve A steht. Die Immissionsrichtwerte für Immissionsorte außerhalb von Gebäuden nach TA Lärm sind in Tabelle 5 dargestellt. Zusätzlich gilt, dass einzelne kurzzeitige Geräuschspitzen die Immissionsrichtwerte am Tage um nicht mehr als 30 dB(A) und in der Nacht um nicht mehr als 20 dB(A) überschreiten dürfen.

Tabelle 5: Immissionsrichtwerte nach TA Lärm

	Tagsüber (06:00 bis 22:00 Uhr)	Nachts (22:00 bis 06:00)
Industriegebiete	70 dB(A)	70 dB(A)
Gewerbegebiete	65 dB(A)	50 dB(A)
Urbane Gebiete	63 dB(A)	45 dB(A)
Kern-, Dorf-, Mischgebiete	60 dB(A)	45 dB(A)
Allgemeine Wohngebiete / Kleinsiedlungsgebiete	55 dB(A)	40 dB(A)
Reine Wohngebiete	50 dB(A)	35 dB(A)
Kurgebiete, Krankenhäuser, Pflegeanstalten	45 dB(A)	35 dB(A)

Quelle: TA Lärm

Anforderungen an einen maximalen Schallleistungspegel von Wärmepumpen in Innenräumen und im Freien stellen auch die Ökodesign-Verordnungen für Wärmepumpen (siehe Tabelle 6 und Tabelle 7). Der Schallleistungspegel wird entsprechend der Vorgaben der DIN EN 12102:2018-02 bestimmt und in dB(A) angegeben. Der dafür genutzte Referenzpunkt (A7/W55 bei 35 Prozent Drehzahl für L/W-WP) bezieht sich allerdings nicht auf den Maximallastfall. Der maximal zu erwartende Schallpegel ist aber ausschlaggebend, um einen geeigneten Aufstellort der Anlage festlegen zu können und Lärmbelästigung der Nachbarschaft auszuschließen. Die Hersteller geben daher meistens zusätzlich zur Vorgabe aus DIN EN 12102 einen maximalen Schallpegel oder Schallpegel bei Nachtbetrieb an. Hierbei ist jedoch der Referenzpunkt nicht ersichtlich und keine Vergleichbarkeit gegeben.

1.3.2.6 Ökodesign und Energieverbrauchskennzeichnung

Die Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte (sog. Energy-related Products (ErP)-Richtlinie bzw. Ökodesign-Richtlinie) regelt die Mindesteffizienz und Umweltverträglichkeit von Produkten (EU, 2009). In Deutschland wird diese Richtlinie durch das Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz (EVPG) umgesetzt. Dieses regelt ergänzend zur EU-Richtlinie die Zuständigkeiten in Deutschland für die Konformitätsprüfung, die Marktaufsicht und das Meldeverfahren bei Nichterfüllung der Anforderungen.

Die Ökodesign-Regularien werden auf Basis der Verordnung (EU) 2017/1369 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2017 zur Festlegung eines Rahmens für die Energieverbrauchskennzeichnung und zur Aufhebung der Richtlinie 2010/30/EU um Anforderungen zur Kennzeichnung („Labelling“) von Produkten ergänzt (EU, 2017).

Die Produkte werden nach Produktgruppen für bestimmte Anwendungen zusammengefasst, für die durch weitere Verordnungen produktgruppen-spezifische Anforderungen ergänzt bzw. detailliert werden. Somit ergibt sich aus Markt- und Verbrauchersicht ein Push-Pull-Effekt („Push“ durch Ökodesign und „Pull“ durch Energieverbrauchskennzeichnung) hin zu energieeffizienteren Produkten.

- **Wärmepumpen zur Raumheizung und Kombi-Wärmepumpen für Raumheizung und Warmwasserbereitung** unterliegen der Verordnung (EU) Nr. 813/2013 (Ökodesign) und der Verordnung (EU) Nr. 811/2013 (Energieverbrauchskennzeichnung).

- **Brauchwasserwärmepumpen fallen unter „Warmwasserbereiter“** („Water heaters“) und somit die Verordnung (EU) Nr. 814/2013 (Ökodesign) und die Verordnung (EU) Nr. 812/2013 (Energieverbrauchskennzeichnung).

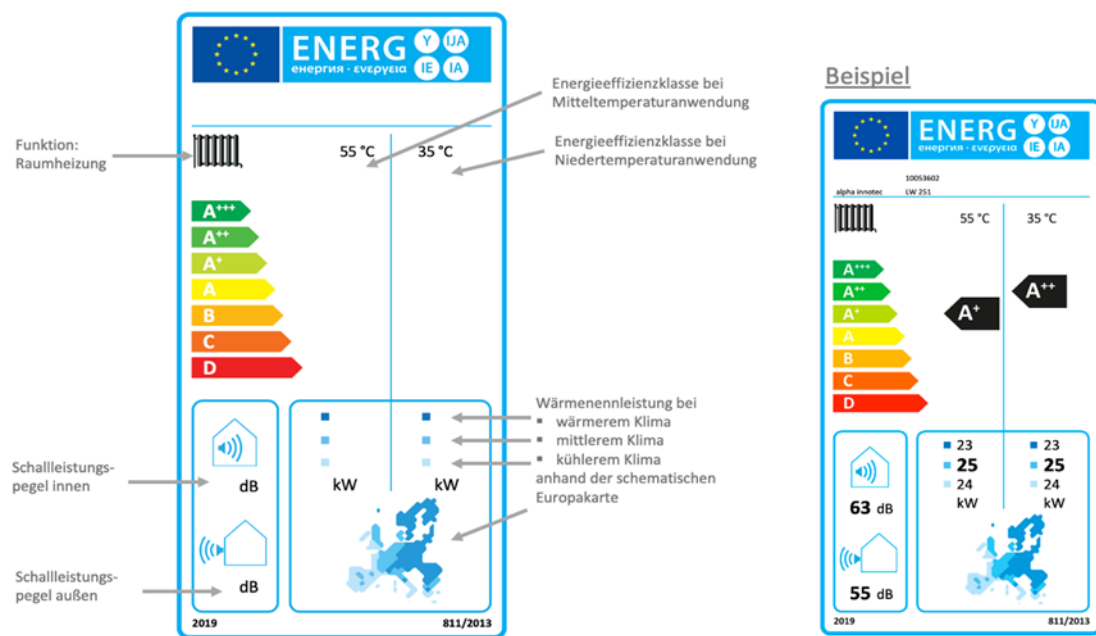
Energieverbrauchskennzeichnung

Alle Hauswärmepumpen müssen mit einer durch die EU-Verordnungen 811/2013 und 812/2013 vorgeschriebenen **Energieverbrauchskennzeichnung („Energietagelabel“)** gekennzeichnet werden. Diese Energietagelabels machen es den Verbraucher*innen einfacher, Produkte mit hoher Energieeffizienz zu erkennen. Hierbei gibt es unterschiedliche Labels für Einzelprodukte, welche die Hersteller ausstellen, und Verbundanlagen aus Kombiheizgeräten, Temperaturreglern und Solareinrichtungen.

Ein Beispiel für ein Label für eine Raumheizungs-Wärmepumpe nach der Verordnung (EU) Nr. 811/2013 zeigt Abbildung 1. Bei Wärmepumpen, die als Kombiheizgerät sowohl der Raumheizung als auch der Warmwassererwärmung dienen, wird für beide Zwecke eine Effizienzklasse angegeben.

- Niedertemperatur-Wärmepumpen mit einer jahreszeitbedingten Raumheizungseffizienz $\eta_{a,s} \geq 175$ Prozent erhalten die Klasse A+++; solche für Mitteltemperaturanwendungen erhalten A+++ ab $\eta_{a,s} \geq 150$ Prozent.
- Bei der Warmwasserbereitungsenergieeffizienz für Kombiheizgeräte und Warmwasserbereitern werden die Klassen nach Lastprofilen eingeteilt; im Lastprofil L beispielsweise erhält ein Gerät die Klasse A+++ für ein $\eta_{a,wh}$ von ≥ 188 Prozent (EU, 2013a, 2013b).

Abbildung 1: Energieverbrauchskennzeichnung für Raumheizungs-Wärmepumpen



Quelle: ait-deutschland GmbH, bearbeitet durch HEAT GmbH

Ökodesign

Die Verordnung (EU) Nr. 813/2013 (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 Raumheizgeräten und Kombiheizgeräten) (EU, 2013c)

enthält für elektrisch betriebene Wärmepumpen (L/W-WP, S/W-WP, W/W-WP) mit einer Wärmenennleistung ≤ 400 Kilowatt die folgenden Anforderungen, sowohl für Wärmepumpen zur Raumheizung als auch für Kombiheizgeräte mit Wärmepumpen:

- ▶ eine minimale saisonale Raumheizungs-Energieeffizienz, für ein europäisches Referenzklima („Warm“ Athen, „Durchschnittlich“ Straßburg, „Kalt“ Helsinki):
 - Raumheizgeräte und Kombiheizgeräte mit Wärmepumpe, außer Niedertemperatur-Wärmepumpen: Die jahreszeitbedingte Raumheizungs-Energieeffizienz darf nicht unter 110 Prozent fallen.
 - Niedertemperatur-Wärmepumpen: Die jahreszeitbedingte Raumheizungs-Energieeffizienz darf nicht unter 125 Prozent fallen.
- ▶ einen maximalen Geräuschpegel in Innenräumen und/oder im Freien entsprechend der in Tabelle 6 dargestellten Systematik:

Tabelle 6: Anforderungen an den Schalleistungspegel von Raumheizgeräten und Kombiheizgeräten mit Wärmepumpe gemäß Verordnung (EU) Nr. 813/2013

Wärmenennleistung	≤ 6 kW		> 6 kW und ≤ 12 kW		> 12 kW und ≤ 30 kW		> 30 kW und ≤ 70 kW	
	Innen	Außen	Innen	Außen	Innen	Außen	Innen	Außen
Max. Schalleistungspegel (L_{WA})	60 dB	65 dB	65 dB	70 dB	70 dB	78 dB	80 dB	88 dB

Quelle: Verordnung (EU) Nr. 813/2013

- ▶ Für Kombiheizgeräte mit Wärmepumpe (Raumheizung und Brauchwarmwasser durch ein Gerät) zusätzlich eine Mindest-Energieeffizienz für die Warmwasserbereitung entsprechend dem angegebenen Lastprofil (d. h. eine bestimmte Abfolge von Warmwasserzapfungen). Diese liegt in Abstufungen zwischen 32 Prozent für das kleinste Lastprofil (3XS) und 64 Prozent für das größte Lastprofil (4XL).

Die Verordnung Nr. 813/2013 listet auch auf, welche Daten in der technischen Dokumentation der Produkte veröffentlicht werden müssen:

- ▶ Informationen über Zusammenstellung und Zusammenbau von Heizgeräten oder Heizgerätegehäuse mit Wärmeerzeugern
- ▶ Sachdienliche Angaben für das Zerlegen, die Wiederverwendung und/oder Entsorgung nach der endgültigen Außerbetriebnahme

Darüber hinaus legt sie fest, wie die Energieeffizienz für Raumheizung und Warmwasserbereitung zu ermitteln ist. Zum Beispiel wird die saisonale Raumheizungs-Energieeffizienz von Wärmepumpen, die als Primärenergie-Nutzungsgrad angegeben wird, aus dem SCOP abgeleitet, der auf Teillast-Leistungsdaten basiert und um Beiträge korrigiert wird, die Temperaturregelungen und gegebenenfalls den Stromverbrauch der Grundwasserpumpe(n) berücksichtigen. Dies ist in der Verordnung wie folgt formuliert:

„Die jahreszeitbedingte Raumheizungs-Energieeffizienz η_s wird berechnet als jahreszeitbedingte Leistungszahl SCOP, dividiert durch den Umwandlungskoeffizienten CC (Conversion Coefficient) oder die jahreszeitbedingte Heizzahl SPER und berichtigt um Beiträge zur Berücksichtigung der

Temperaturregler sowie bei Raumheizgeräten oder Kombiheizgeräten mit Wasser/ Sole-Wasser-Wärmepumpe des Stromverbrauchs der Grundwasserpumpe(n).“ (EU, 2013c)

Die Verordnung (EU) Nr. 814/2013 (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 Warmwasserbereitern und Warmwasserspeichern) enthält analog für elektrisch betriebene Wärmepumpen für Warmwasserbereitung (L/W-WP, S/W-WP, W/W-WP) mit einer Wärmenennleistung ≤ 400 Kilowatt die folgenden Anforderungen:

- ▶ eine Mindest-Energieeffizienz für die Warmwasserbereitung entsprechend dem angegebenen Lastprofil (d. h. eine bestimmte Abfolge von Warmwasserzapfungen). Diese liegt bei 60 Prozent für das Lastprofil XXL und bei 64 Prozent für das größte Lastprofil (4XL).
- ▶ einen maximalen Geräuschpegel in Innenräumen und/oder im Freien entsprechend der in Tabelle 7 dargestellten Systematik:

Tabelle 7: Anforderungen an den Schalleistungspegel von Warmwasserbereitern mit Wärmepumpe gemäß Verordnung (EU) Nr. 814/2013

Wärmenennleistung	≤ 6 kW		> 6 kW und ≤ 12 kW		> 12 kW und ≤ 30 kW		> 30 kW und ≤ 70 kW	
	Innen	Außen	Innen	Außen	Innen	Außen	Innen	Außen
Max. Schalleistungspegel (L _{WA})	60 dB	65 dB	65 dB	70 dB	70 dB	78 dB	80 dB	88 dB

Quelle: Verordnung (EU) Nr. 814/2013

Die Verordnung Nr. 814/2013 listet auch auf, welche Daten in der Produktinformation von Warmwasserbereitern veröffentlicht werden müssen. Für Warmwasserbereiter mit elektrisch betriebener Wärmepumpe sind das:

- ▶ Technische Parameter wie Modell und Kontakt des Herstellers, die Warmwasserbereitungs-Energieeffizienz, Schalleistungspegel, täglicher Stromverbrauch bei angegebenem Lastprofil
- ▶ Informationen über alle beim Zusammenbau, der Installation oder Wartung des Heizgerätes zu treffenden besonderen Vorkehrungen
- ▶ „Sachdienliche Angaben für das Zerlegen, die Wiederverwendung und/oder die Entsorgung nach der endgültigen Außerbetriebnahme“

Zur Erfüllung der oben beschriebenen Anforderungen werden vorrangig Messungen nach europäischen Normen durchgeführt und in entsprechende Kennwerte überführt. Darin werden für die verschiedenen Wärmepumpentypen im Heizbetrieb als Betriebstemperaturen der Wärmeübertragung Norm-Nennbedingungen vorgegeben (siehe Tabelle 29 sowie Tabelle 30 im Anhang). Für die Außenluft bei L/W-WP sind diese 2°C, 12°C, -7°C und -15°C. Übliche Vergleichspunkte sind hierbei insbesondere 2°C, sowie -7°C für Maximallast.

Relevant sind hier insbesondere:

- ▶ Für Messmethoden und Bedingungen für die Leistungszahl im Heizbetrieb COP:
 - DIN EN 14511-1 bis -4:2019-07 „Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern für die Raumbeheizung und -kühlung“

- DIN EN 16147:2017-08 "Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern - Prüfungen und Anforderungen an die Kennzeichnung von Geräten zum Erwärmen von Brauchwarmwasser"
- Für die Berechnung der jahreszeitbedingten Raumheizungs-Energieeffizienz (η_s) oder der jahreszeitbedingten Leistungszahl (SCOP):
 - DIN EN 14825:2019-07 „Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern zur Raumbeheizung und -kühlung - Prüfung und Leistungsbemessung unter Teillastbedingungen und Berechnung der saisonalen Arbeitszahl“⁸
 - DIN EN 15879-1:2011-05 „Prüfung und Leistungsbemessung von erdreichgekoppelten Direktübertragung-Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern zur Raumbeheizung und/oder -kühlung - Teil 1: Direktübertragung/Wasser-Wärmepumpe“
- Für die Bestimmung des Schallleistungspegels:
 - DIN EN 12102:2018-02 „Klimageräte, Flüssigkeitskühlsätze, Wärmepumpen und Entfeuchter mit elektrisch angetriebenen Verdichtern zur Raumbeheizung und -kühlung - Messung der Luftschallemissionen - Bestimmung des Schallleistungspegels“

1.4 Umweltzeichen, Zertifizierungen und Förderprogramme

Die Kennzeichnung der Energieeffizienz von Heizungswärmepumpen und Warmwasserwärmepumpen durch Ökodesign und die damit verbundenen Kennzeichnungs-Richtlinien auf EU-Ebene sind verbindlich für den Inverkehrbringer der Wärmepumpen. Umweltbezogene Kennzeichnungen sind hingegen in der Regel freiwillig und zielen darauf ab, positive Umwelteigenschaften eines Produktes hervorzuheben.

Im Folgenden werden diese freiwilligen Kennzeichnungen für Wärmepumpen vorgestellt. Hierbei sind insbesondere Typ-I-Umweltzeichen nach Norm DIN EN ISO 14024:2018-06 von anderen Kennzeichnungen zu unterscheiden. Typ-I-Umweltzeichen „sind an private und gewerbliche Verbraucherinnen und Verbraucher gerichtet, weisen eine besondere Umweltqualität aus, sind relevant für die öffentliche Beschaffung, haben eine hohe Glaubwürdigkeit und sind meist sehr bekannt, erfordern eine Drittzertifizierung, beziehen interessierte Kreise ein“ (BMU, 2019). Zu Letzteren gehören unter anderem auch Umwelt- und Verbraucherschutzverbände und Forschungseinrichtungen.

Zu den europaweit am stärksten etablierten Typ-I-Umweltzeichen zählen der Blaue Engel in Deutschland, der Nordic Swan in Skandinavien und das Europäische Umweltzeichen. In Deutschland weist der Blaue Engel einen Bekanntheitsgrad von über 90 Prozent auf (BMU, 2019). Weitere produktbezogene Kennzeichnungen im Wärmepumpenbereich sind die HP Keymark-Zertifizierung sowie das EHPA-Gütesiegel. Hinzu kommen spezifische Zertifizierungen für das Installations- und Wartungspersonal. Weil finanzielle Zuschüsse für die Investitionsentscheidung von Endkund*innen eine erhebliche Rolle spielen und diese teils mit

⁸ Die Ermittlung des SCOP nach der DIN EN 14825 erfolgt für Wärmepumpen mit leistungsgeregelten Verdichtern im Teillastbetrieb bei festgestellten Drehzahlen, ohne dass der Verdichter taktet („On-Off-Betrieb). Bei hohen Wärmequellentemperaturen werden so höhere Leistungen erzielt, als es der Teillastbetrieb erfordern würde. Die Messwerte werden durch Korrekturfaktoren angepasst und auf die notwendige Teillast umgerechnet. Diese Methode steht in der Kritik (Durchführbarkeit erfordert „spezielle“ Regelungen zum Einhalten der Testbedingungen, die Marktüberwachung durch unabhängige, objektive Nachmessungen durch unabhängige Institute ist nur schwer möglich). Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) hat in Zusammenarbeit mit dem UBA einen Vorschlag zur Revision der EN 14825 erarbeitet, der mit modifizierten Messmethoden diesen Nachteil ausgleichen soll (Simo, Palkowski, & Wachau, 2019).

höheren Anforderungen an das Produkt verknüpft sind, wird abschließend in diesem Kapitel auf die wesentlichen Förderprogramme für Wärmepumpen in Deutschland eingegangen.

1.4.1 Umweltzeichen

In allen drei oben genannten Typ-I-Umweltzeichen – das EU Ecolabel, der Blaue Engel und der Nordic Swan – bestehen bzw. bestanden auch Vergabegrundlagen für die Produktkategorie „Wärmepumpen“. Der Katalog von Anforderungskriterien dieser Vergabegrundlagen ist vergleichbar. Das skandinavische Umweltzeichen überschneidet sich in den meisten Kriterien mit dem EU Ecolabel, schließt allerdings neben einzelnen Wärmepumpen auch gesamte Wärmepumpensysteme mit ein (Lange, Kjeldsen, Tofteng, Krag, & Lindgaard, 2014). In der folgenden Tabelle werden die zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Studie gültigen Umweltzeichen hinsichtlich ihrer Kriterien für Wärmepumpen gegenübergestellt (Tabelle 8). Im Anschluss werden alle drei Typ-I-Umweltzeichen im Detail betrachtet.

Tabelle 8: Vergleich von Umweltzeichen für Hauswärmepumpen

Kriterium	EU Ecolabel Warmwasser-Heizgeräte	Nordic Swan 059 Heat Pumps
Festgelegter Geltungsbereich	Wärmeerzeugung durch Aufnahme von Umgebungswärme aus Luft, Wasser, Boden und/oder Abwärme	WP verschiedener Art zur Erwärmung von Wasser und Luft bis 70 kW bzw. 12 kW, inkl. WP-Systeme
Effizienzanforderungen	Basierend auf Raumheizungs-Jahresnutzungsgrad und Warmwasserbereitungs-Nutzungsgrad	Nach EU Energy Labelling Regulation (626/2011/EU)
Emissionsobergrenzen für Treibhausgase - TEWI ⁹ [g CO ₂ -Äquivalent/kWh Heizwärme]	150	Kein TEWI System
Kältemittelvorgaben (GWP100)	< 2000	bei GWP100 < 150 ist eine Energieeffizienzklasse geringer gestattet
Anforderung an Betriebsgeräusche [dB], Prüfung nach EN 12-102	Berechnungsformel $17 + 36 \times \log(PN + 10)$ dB(A)	✓ Die Anforderungen an die Betriebsgeräusche richten sich nach Art der Wärmepumpe und Leistung
Anforderung an verwendete Materialien und Chemikalien	✓	✓
Installationsanleitung und Benutzerhinweise	✓	✓
Enthaltene Garantie	✓	✓

⁹ „Die klimaschädlichen Emissionen von Wärmepumpen werden über den TEWI (Total Equivalent Warming Impact) als Systemparameter bewertet. Der TEWI beschreibt die gesamte Klimawirkung einer Anlage, umgerechnet in CO₂ („CO₂-Äquivalenten“) je bereitgestellter Wärme. Durch die Festlegung von TEWI-Grenzwerten an Stelle von Grenzwerten für die Effizienz der Wärmepumpenanlage oder des Treibhauspotentials der Kältemittel ist es möglich, Emissionen von Kältemitteln mit einem hohen Treibhauspotential durch sehr geringe energiebedingte Emissionen (Anlagen mit hoher Effizienz) auszugleichen und umgekehrt“ (RAL gGmbH, 2012).

Kriterium	EU Ecolabel Warmwasser-Heizgeräte	Nordic Swan 059 Heat Pumps
Verfügbar	2007/742/EG (Wärmepumpen): 07.11.2007 – 31.12.2016 2014/314/EU (Warmwasser-Heizgeräte): ab 28.05.2014	03.2013 – 03.2021 (Version 3.5.)

Der Blaue Engel

In Deutschland gab es bereits verschiedene Fassungen eines Blauen Engels für Wärmepumpen. Die Vergabegrundlage wurde zunächst in zwei Produktgruppen unterteilt: „energiesparende Wärmepumpen nach dem Absorptionsprinzip, dem Adsorptionsprinzip oder mit verbrennungsmotorisch angetriebenen Verdichtern“ (RAL-UZ 118) und „energiesparende Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern“ (RAL-UZ 121). In der Weiterentwicklung beider Produktgruppen wurde der Fokus auf den bereits in RAL-UZ 121 vorhanden TEWI-Ansatz gesetzt und dieser als zentrales Effizienzkriterium für Wärmepumpen und Maß für die Klimawirkung verwendet (Bost, Braunmühl, & Hirschl, 2011). Die neue Fassung des Blauen Engels für „Energiesparende Wärmepumpen“ (RAL-UZ 118) galt ab 2012 und endete 2017, da es nach Auskunft der RAL gGmbH keine Anträge und somit auch keine zertifizierten Produkte gab. Der Geltungsbereich sah Anlagen bis zu einer Nennwärmeleistung von max. 100 Kilowatt vor (bei einer Vorlauftemperatur von 35 Grad Celsius); außerdem beinhaltete das Umweltzeichen auch mit Gasmotoren betriebene Absorptions- bzw. Adsorptions-Wärmepumpen. Dieses Umweltzeichen umfasste die folgenden Eckpunkte (RAL gGmbH, 2012):

1. Vorgabe von TEWI-Grenzwerten, welche entweder durch den Einsatz von Kältemitteln mit einem geringen GWP oder durch die weitere Effizienzsteigerung von Produkten mit Kältemitteln mit einem hohen GWP erreicht werden konnte.
2. Vorgabe zu max. Geräuschemissionen von außen aufgestellten Wärmepumpen bis 20 Kilowatt (A-bewerteter Schallleistungspegel L_{Wad} gemäß EN 12102 gemessen und mit einem entsprechend nach ISO 4871 ermittelten Korrekturwert zu beaufschlagen)
3. Einsatz von hocheffizienten, drehzahlgeregelten Umwälzpumpen
4. Anforderungen an Einstellanleitung für Fachpersonal
5. Anforderungen an Bedienungsanleitung für Endkund*innen (Angaben zu Handhabung und Wartung der Anlage)
6. Vorgaben, die den Prinzipien zum „Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte“ folgen und Ausschluss bestimmter Stoffe/Chemikalien

Folgende Gründe wurden nach Konsultation des Umweltbundesamts identifiziert, warum der Blaue Engel für Wärmepumpen 2017 nicht verlängert wurde:

1. Anforderungen des Blauen Engels waren nicht Bestandteil von Förderprogrammen, dadurch fehlende Verknüpfung zur Förderung
2. Die verpflichtende Kennzeichnung im Rahmen der Energieverbrauchskennzeichnung führte zu Zurückhaltung bei Herstellern (Spannungsfeld Pflichtkennzeichnung und freiwillige Kennzeichnung), da diese eine bessere Orientierung bot. Die bisherigen Kriterien (z.B. TEWI-Ansatz) unterschieden sich nicht in ausreichendem Maße von den Ökodesign-Anforderungen, sodass sich Hersteller durch eine Zeichennahme mit dem Produkt nicht vom Marktdurchschnitt abheben konnten.

3. Zusätzlicher Aufwand und Kosten für Hersteller für die Beantragung des Blauen Engels standen nicht im Verhältnis zu geringem Einfluss auf die Kauf-/Investitionsentscheidung von Endkunden*Endkundinnen. Die Kaufentscheidung für ein bestimmtes Wärmepumpenmodell ist stark von der Produktempfehlung des Fachhandwerks geprägt und Endkunden*Endkundinnen waren unzureichend über das Umweltzeichen informiert. Dies hängt auch damit zusammen, dass der Anteil der Wärmepumpe am Markt der Heizungssysteme sehr gering war, was die Positionierung des Umweltzeichens erschwerte.
4. Unzureichendes Marketing zum Blauen Engel: eine Positionierung des Blauen Engels und die Bekanntmachung der Produktgruppe ist essenziell, wird aber nicht von den Herstellern geleistet.

Das EU Ecolabel

Ein EU Ecolabel („Blume“) für Wärmepumpen existierte zunächst von 2007 bis Ende 2016 (Entscheidung der Kommission vom 9. November 2007 zur Festlegung der Umweltkriterien für die Vergabe des EG-Umweltzeichens an Elektro-, Gasmotor- oder Gasabsorptionswärmepumpen (2007/742/EG)) (EU, 2007). Mit der Blume ausgezeichnete Wärmepumpen sollten folgende Aspekte sicherstellen:

1. Verbesserte Energieeffizienz im Heiz- und Kühlbetrieb
2. Verringerung oder Vermeidung der Risiken für die Umwelt und für die menschliche Gesundheit im Zusammenhang mit dem Einsatz von gefährlichen Substanzen
3. Geringere Auswirkungen auf die globale Erwärmung
4. In der Produktdokumentation enthaltene Anweisungen für die korrekte Verwendung in der Umwelt

In Bezug zum Kältemittel enthielt dieses Zeichen folgende Vorgabe: Das globale Treibhauspotenzial über einen Zeitraum von 100 Jahren (GWP_{100}) darf den Wert von 2.000 nicht übersteigen. Dabei gibt es den Zusatz, dass bei der Verwendung eines Kältemittels mit einem GWP -Wert kleiner 150 die festgelegten Mindestwerte von Leistungszahl (COP) und Heizzahl (PER) im Heizmodus und Energiewirkungsgrad (EER) im Kühlmodus um 15 Prozent herabgesetzt werden dürfen (EU, 2007).

Mit dem Beschluss der Kommission vom 28. Mai 2014 zur Festlegung von Kriterien für die Vergabe eines EU-Umweltzeichens für Warmwasser-Heizgeräte (2014/314/EU), zu denen auch Wärmepumpen zählen, wurde eine TEWI-Berechnung für die Anforderungen an die Geräte zugrunde gelegt. Zum Kältemittel heißt es, dass das Treibhauspotenzial über einen Zeitraum von 100 Jahren (GWP_{100}) einen Wert von 2.000 nicht überschreiten darf (EU, 2014a) (siehe auch Tabelle 8).

Während das EU Ecolabel für Warmwasser-Heizgeräte nach wie vor gültig ist, wurde das EU Ecolabel für Wärmepumpen (2007/742/EG) aufgrund fehlender Zeichennehmer 2016 eingestellt. Nach Konsultation der europäischen Kommission wurden dafür folgende Gründe identifiziert:

1. Keine Verknüpfung mit Förderprogrammen: Finanzielle Anreize sind für Verbraucher*innen wichtig, da Wärmepumpen eine erhebliche finanzielle Investition darstellen. Zudem sollten Förderprogramme eine Signalwirkung für „grüne“ Produkte haben.

Veraltete Prüfungsanforderungen: Kosten für Prüfungen durch Dritte wurden als Problem erkannt, sind allerdings für die Glaubwürdigkeit des EU Ecolabels unerlässlich. Zudem waren die Anforderungen für das EU Ecolabel nicht mit den Kriterien der Energieverbrauchskennzeichnung und des Ökodesign-Standards (siehe hierzu auch Kapitel 1.3.2.6) abgestimmt und stellten einen zusätzlichen Aufwand dar.

2. Begrenzte Kommunikation und Sensibilisierung der Verbraucher*innen: Fehlende Instrumente, mit denen Hersteller über die Vorteile von EU Ecolabel-zertifizierten Wärmepumpen informieren könnten (z.B. quantitative Daten über Energie- oder Geldeinsparungen während eines Nutzungsjahres). Zudem fehlt bei Verbraucher*innen das Bewusstsein über EU Ecolabel-zertifizierte Produkte und es bedarf einer besseren Abgrenzung zum Energielabel.
3. Hersteller bevorzugen, in solche Umweltzeichen zu investieren, die in ihrer Verkaufsregion bekannt sind.
4. Starker Einfluss des Fachhandwerks bei der Auswahl der zu installierenden Systeme.

Nordic Swan

Der Nordic Swan definierte in bereits verschiedenen Fassungen als zertifizierbare Produktgruppe serienmäßig hergestellte Elektro-Wärmepumpen für die Raumbeheizung, mit oder ohne Option der Brauchwarmwasserbereitung. Da sich nur ein Zeichennehmer fand, wurde die letzte Fassung im März 2021 nicht verlängert und somit gibt es aktuell keinen gültigen Nordic Swan für Wärmepumpen. In der Vergangenheit zugelassen für eine Auszeichnung mit dem Nordic Swan waren Einzelgeräte der folgenden Typen (Nordic Ecolabelling, 2018):

1. Zur Erwärmung von **Wasser bis zu 70 Kilowatt**
 - a. L/W-WP (Wärmequelle: Außenluft)
 - b. Abluft-Wärmepumpen (Wärmequelle: Raumluft)
 - c. W/W-WP- oder S/W-WP (Wärmequelle: Erdwärme, Seewasser/Frischwasser oder Abwärme von z. B. Grauwasser)
2. Zur Erwärmung von **Luft bis zu 12 Kilowatt:**
 - a. L/L-WP (Wärmequelle: Außenluft)

Voraussetzung für die Erlangung des Umweltzeichens Nordic Swan war folgendes Zulassungsverfahren (Nordic Ecolabelling, 2018):

1. Die Wärmepumpe ist einer Effizienz- und Schallimmissionsprüfung zu unterziehen. Die Energieeffizienz der Wärmepumpe ist gemäß EN 14511 zu prüfen, sowohl für die Heizfunktion als auch für die Kühlfunktion (falls zutreffend), einschließlich der Fälle, in denen Kohlendioxid als Kältemittel verwendet wird. EN 14825 ist für die Prüfung verschiedener Lasten und die Berechnung der durchschnittlichen Jahresarbeitszahl zu verwenden.
2. Die durchschnittliche Jahresarbeitszahl (JAZ bzw. SCOP) ist auf der Grundlage der jeweiligen Klimazone gemäß den Definitionen in der Ökodesign- und Energiekennzeichnungsverordnung in LOT 1 und der Ökodesign-Verordnung (206/2012/EU) und der Energiekennzeichnungsverordnung (626/2011/EU) zu berechnen. Das verwendete Berechnungsprogramm muss den Anforderungen der oben genannten Richtlinien entsprechen.
3. Die Schallimmissionen werden gemäß EN 12102 geprüft.
4. In Fällen, in denen mehr als drei Größenmodelle derselben Serie mit dem Nordic Swan ausgezeichnet werden sollen, muss nach Genehmigung durch Nordic Ecolabelling nur das kleinste Größenmodell und ein weiteres Größenmodell getestet werden.
5. Flüssigkeits-/Wasser-Wärmepumpen müssen nicht in Klimazone C getestet werden.

Zur Zertifizierung mit dem Nordic Swan war eine umfassende Dokumentation in den folgenden fünf Bereichen erforderlich: Herstellung; Betrieb der Wärmepumpe; Kundeninformationen; Informationen für Händler und Installateure; Qualität, Umweltmanagement und gesetzliche Anforderungen (Nordic Ecolabelling, 2018).

Nach Rücksprache mit Verantwortlichen des Nordic Swan ist für das Umweltzeichen für Wärmepumpen keine Verlängerung geplant, da es in den letzten Jahren nur einen Zeichennehmer gab. Als Gründe dafür wurden genannt, dass die in den skandinavischen Ländern hohe Marktsättigung von Wärmepumpen ein spezifisches Umweltzeichen weniger relevant mache. Diese geminderte Relevanz für ein Umweltzeichen ist ähnlich zum früheren Blauen Engel in Deutschland, hier allerdings durch einen zu geringen Marktanteil von Wärmepumpen. Des Weiteren wurde angemerkt, dass einige Anforderungen zum Ausschluss kritischer Stoffe bei der Materialienzusammensetzung von Wärmepumpenbestandteilen zu spezifisch und damit zu schwer zu erreichen waren.

1.4.2 Weitere produktbezogene Kennzeichnungen

Heat Pump (HP) Keymark (CEN Keymark, 2021b) und das **EHPA Quality Label** (EHPA, 2021f) sind die relevantesten weiteren produktbezogene Kennzeichnungen, die auf europäischer Ebene etabliert sind. HP Keymark dient der Überprüfung der Herstellerdeklaration und der gesetzlichen Anforderungen (Ökodesign) durch unabhängige Dritte, während das EHPA Quality Label Wärmepumpen bewertet und über die gesetzlichen Mindestanforderungen hinausgeht. Beide Kennzeichnungen gelten für Wärmepumpen mit einer Leistung von bis zu 400 Kilowatt. Neben HP Keymark gibt es die weniger verbreitete Zertifizierung nach Eurovent Certita sowie nationale Zertifizierungen wie Marque NF in Frankreich oder MCS in Großbritannien. Hinzu kommt das „SG Ready“-Label, mit welchem Wärmepumpen ausgezeichnet werden können, die zum Lastmanagement der Stromnetze beitragen.

HP Keymark

Das HP Keymark Zeichen wurde 2015 entwickelt und ist eine Zertifizierung durch Dritte nach Typ 5, wie in der Norm ISO/IEC 17067:2013-12 “Conformity assessment – Fundamentals of product certification and guidelines for product certification schemes” definiert. Die Kennzeichnung wird von den meisten bekannten Herstellern verwendet. Als Ausnahmen sind Glen Dimplex und Hautech sowie Auer (Frankreich) und Horwal (Schweiz) zu nennen. Derzeit sind über 3900 Wärmepumpenmodelle mit HP Keymark zertifiziert (CEN Keymark, 2021a).

Das HP Keymark-Zertifikat ist freiwillig. Es bietet Herstellern den Vorteil, mit einer Zertifizierung und ohne zusätzliche landesspezifische Prüfnachweise ihre Wärmepumpen in einer Vielzahl von europäischen Staaten als förderfähige Produkte anbieten zu können. So ist die Zertifizierung in Frankreich, Großbritannien, Deutschland, Tschechien und der Slowakei für staatliche Förderprogramme anerkannt. Zudem kann HP Keymark auch in Finnland, Norwegen, Schweden, Slowenien, Italien, Griechenland, Portugal, Spanien und Wallonien (Belgien) genutzt werden, wo keine Zertifizierung für eine staatliche Förderung erforderlich ist (CEN Keymark, 2021c).

Träger des Zertifikats ist die europäische Normenstelle CEN. Neun akkreditierte Stellen und 19 Testcenter aus verschiedenen EU-Mitgliedstaaten gewährleisten den Zertifizierungsprozess bzw. führen diesen durch, darunter in Deutschland DIN Certco/TÜV Rheinland und VDE. Der Zertifizierungsprozess beinhaltet folgende Schritte (Förster & Vehring, 2018):

- a. Beantragung des Zertifikates durch Hersteller oder Vertreiber des Produkts bei einer der teilnehmenden Zertifizierungsstellen
- b. Werks- bzw. Produktionskontrolle durch einen autorisierten Prüfer, inklusive stichprobenartige Auswahl von Testgeräten
- c. Prüfung der Testgeräte in einer akkreditierten Prüfstelle
- d. Konformitätsbewertung aller Berichte und Dokumente durch Zertifizierungsstelle

Folgende europäische Normen und Richtlinien sind Inhalt der Keymark-Prüfung und Zertifizierung:

- ▶ DIN EN 14511-1 bis -4 „Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern für die Raumbeheizung und -kühlung“ oder DIN EN 16147 „Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern – Prüfungen und Anforderungen an die Kennzeichnung von Geräten zum Erwärmen von Brauchwarmwasser“
- ▶ DIN EN 14825 „Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern zur Raumbeheizung und -kühlung – Prüfung und Leistungsbemessung unter Teillastbedingungen und Berechnung der saisonalen Arbeitszahl“
- ▶ DIN EN 15879-1 „Prüfung und Leistungsbemessung von erdreichgekoppelten Direktübertragung-Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern zur Raumbeheizung und/oder -kühlung – Teil 1: Direktübertragung/Wasser-Wärmepumpe“
- ▶ DIN EN 12102 „Klimageräte, Flüssigkeitskühlsätze, Wärmepumpen und Entfeuchter mit elektrisch angetriebenen Verdichtern zur Raumbeheizung und -kühlung – Messung der Luftschallemissionen – Bestimmung des Schallleistungspegels“
- ▶ Verordnung (EU) Nr. 813/2013 zur umweltgerechten Gestaltung (Ökodesign) von Raumheizgeräten und Kombiheizgeräten (EU, 2013c) oder Verordnung (EU) Nr. 814/2013 zur umweltgerechten Gestaltung (Ökodesign) von Warmwasserbereitern und Warmwasserspeichern (EU, 2013d).

Nach positivem Bewertungsergebnis wird das HP Keymark-Zertifikat erteilt, das eine Gültigkeit von 10 Jahren hat. Das Zertifikat kann auf Antrag um jeweils weitere 10 Jahre verlängert werden. Voraussetzung ist eine erfolgreich bestandene jährliche Produktionskontrolle (Factory Production Control, FPC) und Wiederholungsprüfung der Produkte alle 2 Jahre.

EHPA Quality Label

Das EHPA Quality Label ist aus einem Gütesiegel der DACH-Region entstanden; hier ist es auch nach wie vor am weitesten verbreitet. Aktuell wird das EHPA Quality Label in zwölf Ländern genutzt: Österreich, Belgien, Tschechien, Dänemark, Finnland, Deutschland, Polen, Slowakei, Schweden, Schweiz, Vereinigtes Königreich. Zusätzlich soll es in Frankreich etabliert werden (EHPA, 2021e). In der im Internet einsehbaren Datenbank sind über 6000 Modelle registriert (EHPA, 2021b)¹⁰.

Wie HP Keymark beinhaltet auch das EHPA Quality Label eine externe Prüfung der Herstellerdeklaration in einer akkreditierten Prüfstelle. In Deutschland sind dafür bislang fünf Testinstitute autorisiert (EHPA, 2021g):

1. TÜV Rheinland Immissionsschutz und Energiesysteme GmbH
2. TÜV SÜD Industrie Service GmbH
3. VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut
4. ILK Dresden (Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH)
5. Universität Stuttgart, Prüfstelle HLK am Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Wärmespeicherung

Weil das Prüfrelement des EHPA Quality Labels auf denselben europäischen Normen und Richtlinien wie HP Keymark basiert, wird eine externe Prüfung gemäß HP Keymark anerkannt.

Neben der Konformitätsprüfung von Testgeräten geht das EHPA Quality Label in folgenden wesentlichen Punkten über den gesetzlichen Mindeststandard hinaus (EHPA, 2021a):

1. Erfüllung von minimalen SCOP-Werten für Wärmepumpen (Raumwärme), die in einer nach ISO 17025:2018-03 akkreditierten Prüfstelle nachgewiesen werden. Die einzelnen Anlagenkategorien müssen die folgenden Mindest-SCOP erfüllen:
 - a. Sole/Wasser-Wärmepumpen: 4,1
 - b. Wasser/Wasser-Wärmepumpen: 4,1
 - c. Luft/Wasser-Wärmepumpen: 3,5
 - d. Erdreichgekoppelte Direktübertragung/Wasser-Wärmepumpen: 4,1
 - e. Abluft/Wasser-Wärmepumpen: 3,5
 - f. Luft/Luft-Wärmepumpen: 3,4
2. Angabe der Schallemissionen nach Prüfnorm EN 12102.
3. Verfügbarkeit u.a. von Planungs-, Service- und Bedienungsdokumenten in der Sprache des Landes, in dem die Wärmepumpe vertrieben wird.
4. Vollgarantie von 2 Jahren und Ersatzteilverfügbarkeit von 10 Jahren
5. Nachweise eines Kundendienstes im Verkaufsgebiet, der innerhalb von 24 Stunden auf Verbraucheranfragen reagiert.

Werden alle Anforderungen erfolgreich nachgewiesen, ist das EHPA Quality Label für drei Jahre gültig und kann höchstens zweimal für jeweils drei Jahre verlängert werden.

„SG Ready“-Label

Mit dem “SG-Ready”-Label können Smart-Grid (SG)-fähige Wärmepumpen ausgezeichnet werden, welche zum Lastmanagement der Stromnetze beitragen. Das Label umfasst folgende Anforderungen (BWP, 2021f):

- Heizungswärmepumpen: Regelung für unterschiedliche Betriebszustände, um Strom, welcher nicht eingespeist werden kann, in Form von thermischer Energie zu speichern oder im Falle von Verbrauchsspitzen die Wärmepumpe zeitweise komplett abzuschalten.
- Warmwasserwärmepumpen: Regelung, um Warmwasser-Solltemperatur automatisch zum Zweck der thermischen Speicherung zu erhöhen.
- Schnittstellen-kompatible Systemkomponenten: Unter entsprechenden Voraussetzungen kann für weitere Systemkomponenten das SG-Ready-Label beantragt werden.

Das Label wird aktuell nur in Deutschland, Österreich und der Schweiz vergeben. Derzeit sind knapp 1.800 Wärmepumpen mit dem Label ausgezeichnet¹¹ (BWP, 2021e).

1.4.3 Zertifizierung von Personal und Firmen

Wärmepumpen werden häufig von Heizungsinstallateuren geplant, eingebaut und in Betrieb genommen. In Deutschland gibt es für Wärmepumpeninstallateure eine optionale Qualifizierung nach VDI 4645 (Sachkundiger für Wärmepumpensysteme nach VDI 4645). Diese Norm behandelt die Planung, Dimensionierung und Inbetriebnahme von Wärmepumpen in Ein- und Mehrfamilienhäusern. Eine Online-Datenbank ermöglicht das Finden von registrierten – nach VDI 4645 qualifizierten – Sachkundigen (BWP, 2021c).

Wärmepumpen beinhalten jedoch Kältemittelkreisläufe. Nur zertifiziertes Personal – in Deutschland sind dies üblicherweise Kälteanlagenbauer oder -mechatroniker – darf am Kältemittelkreislauf arbeiten oder diesen „öffnen“. Regularien zur Ausbildung und Zertifizierung

¹¹ Stand Oktober 2021

von Personal, welches mit Kältemitteln und Kältemittelkreisläufen arbeitet, dienen dazu, die Sicherheit in der Installation, beim Betrieb, bei der Wartung und der Entsorgung zu gewährleisten und die Leckage von Kältemittel zu verhindern.

Die hierfür relevantesten Regularien werden im Folgenden kurz beschrieben:

- **F-Gas-Verordnung (Verordnung (EU) Nr. 517/2014):** Mit dem Ziel, Emissionen fluoriertem Kältemittel zu vermeiden, beinhaltet die F-Gas-Verordnung Vorgaben zur Zertifizierung von Personal und Unternehmen. Insbesondere legt die zugehörige **Durchführungsverordnung (EU) 2015/2067** Mindestanforderungen an die Zertifizierung von Betrieben und Personen fest, die Geräte mit F-Gasen installieren, warten, reparieren, deinstallieren, auf Dichtheit überprüfen oder Kältemittel zur Entsorgung oder Wiederaufbereitung entnehmen. Betreiber von Wärmepumpen müssen sicherstellen, dass diese Tätigkeiten nur von entsprechend zertifiziertem Personal durchgeführt werden, d.h. Personen, die eine theoretische und praktische Prüfung (für eine von vier Kategorien) bestanden und von einer Prüfstelle ein entsprechendes Zertifikat erhalten haben.

Die F-Gas-Verordnung deckt derzeit nur teilfluorierte Kohlenwasserstoffe, perfluorierte Kohlenwasserstoffe, Schwefelhexafluorid und andere Treibhausgase, die Fluor enthalten ab, jedoch nicht die natürlichen Kältemittel. Dichtheitskontrollen betreffen Anlagen, die fluorierte Treibhausgase in einer Menge von 5 Tonnen CO₂-Äquivalent oder mehr enthalten. Dies kann größere Wärmepumpen betreffen, und solche, die noch ein Kältemittel mit hohem GWP (wie R410A oder 407C) verwenden.

Da natürliche Kältemittel jedoch zunehmend als klimafreundliche Alternativen zu HFKW in Kälte- und Klimaanlageanlagen und Wärmepumpen eingesetzt werden, gibt es die Forderung, dass die Überarbeitung der F-Gas-Verordnung auch die Ausbildung und Zertifizierung für den Umgang mit natürlichen Kältemitteln berücksichtigt.

- Der Standard **EN 13313:2011-02** Kälteanlagen und Wärmepumpen - Sachkunde von Personal sowie ein entsprechender, aber noch nicht final herausgegebener ISO Standard (ISO/DIS 22712:2018) beschreibt ebenfalls die Fähigkeiten, die für den Umgang mit Kältemitteln und Kältemittelkreisläufen beherrscht werden sollten. Diese dienen als Grundlage für die technische Qualifizierung. Der noch im Entwurf befindliche ISO/DIS 22712:2018 enthält separate Angaben für den Umgang mit CO₂, Kohlenwasserstoffen und Ammoniak.

Weiterhin werden in den Ausbildungsgängen von Kältetechniker*innen relevante Sicherheitsstandards wie die DIN EN 378-1-4 Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen - Teil 1-4 und die DIN EN 50110:2014-02 zum Betrieb von elektrischen Anlagen unterrichtet. Auch die Ausbildung im Hartlöten ist von Relevanz, ganz besonders im Umgang mit brennbaren Kältemitteln. Hier regelt der ISO 13585:2012 die Prüfung von Hartlötern und Bedienern von Hartlöteinrichtungen.

- Eine weitere, bei Erdwärme-Wärmepumpen relevante, Zertifizierung ist die Technische Regel DVGW W 120-2 „Qualifikationsanforderungen für die Bereiche Bohrtechnik und oberflächennahe Geothermie (Erdwärmesonden)“ Diese Regel definiert Qualifikations- und Qualitätsanforderungen, welche die Bohrfirmen im Arbeitsbereich Erdwärmesondenbohrungen nach dem aktuellen Stand der Technik erfüllen müssen. Auf Landesebene gibt es hier beispielsweise die baden-württembergischen Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden (LQS-EWS).

1.4.4 Förderprogramme

Die bisher bestehenden Förderprogramme der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) und des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) wurden bis zum Juli 2021 aufgelöst. Sie werden stattdessen in der Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) neu strukturiert und zusammengefasst (KfW, 2021a). Die BEG unterteilt sich dabei in die in Tabelle 9 aufgeführten Programme.¹²

Tabelle 9: Übersicht über die Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG)

BEG 2021	Gültig ab	Zuschuss über	Kredit über
Sanierung von Wohngebäuden mit Einzelmaßnahmen (BEG EM)	01.01.2021	BAFA	KfW
Komplettsanierung & Neubau Wohngebäude (BEG WG)	01.07.2021	KfW*	KfW
Komplettsanierung & Neubau Nichtwohngebäude (BEG NWG)	01.07.2021	KfW*	KfW

* Wird ab 2023 vom BAFA übernommen

Quelle: Ökozentrum NRW (ÖkoZentrum NRW, 2021)

Für den Einbau einer L/W-WP, S/W-WP sowie einer W/W-WP bei der Sanierung können Zuschüsse bis zu 50 Prozent über die BAFA aus dem BEG EM-Programm genutzt werden. Im Rahmen der Förderung von Einzelmaßnahmen für die Gebäudesanierung (BEG EM) wurde zum 1. Januar 2021 auch eine Förderung für Fachplanung und Baubegleitung eingeführt. Gleichzeitig wird ein individueller Sanierungsfahrplan (iSFP) honoriert. Wird dieser in Anspruch genommen, so erhöht sich der vorgesehene Fördersatz um fünf Prozent für diese Maßnahme ("iSFP-Bonus"). Folgende Tabelle verdeutlicht den Geltungsbereich der unterschiedlichen Förderungen sowie deren wichtigste Fördervoraussetzungen.

Tabelle 10: Übersicht Förderprogramme

Förderinstitut / Programm	Geltungsbereich / wichtigste Fördervoraussetzungen	Förderung
BEG EM; BAFA-Zuschuss	Sanierung zertifizierte Einzelprüfung hydraulischer Abgleich	35% der förderfähigen Investitionskosten von höchstens 60.000 €, max. 21.000 €
BEG EM; BAFA-Zuschuss „Öl-Austauschprämie“	Sanierung Ersatz einer alten Ölheizung	zusätzlich 10%, insgesamt 45% der förderfähigen Investitionskosten von höchstens 60.000 €, max. 27.000 €
BEG EM; BAFA-Zuschuss „iSFP-Bonus“	Sanierung Installation der Wärmepumpe muss in individuellen Sanierungsfahrplan (iSFP) empfohlen worden sein	zusätzlich 5%, insgesamt bis zu 50% der förderfähigen Investitionskosten von höchstens 60.000 €, max. 30.000 €

Zusätzlich zu den Zuschüssen der BEG EM können im Rahmen der KfW-Förderungen Kredite für Neubau und Sanierungen in Anspruch genommen werden. Im Neubau und bei umfassenden

¹² In dieser Studie wurde nur die staatliche BEG Förderung beschrieben, da die überwältigende Mehrheit der Förderungen aus diesem Programm stammen.

Sanierungen gibt es keine Einzelmaßnahmen mehr, hier werden Wärmepumpen im Rahmen der Effizienzhäuser (KfW) gefördert.

Damit das BAFA eine BEG-Förderung für den Einbau einer Wärmepumpe gewähren kann, sind eine Reihe von Voraussetzungen zu erfüllen. Es müssen alle Verbräuche und alle erzeugten Wärmemengen messtechnisch erfasst werden. Außerdem ist das Heizsystem ab dem 01. Januar 2023 mit einer Energieverbrauchs- und Effizienzanzeige auszurüsten. Die BEG schreibt überdies Anforderungen an die jahreszeitbedingte Raumheizungseffizienz (ETAs) vor, die von der Heizungsart und den Temperaturen im Heizsystem abhängen (siehe Tabelle 11).

Tabelle 11: Anforderungen an die jahreszeitbedingte Raumheizungseffizienz

Wärmepumpenart	Jahreszeitbedingte Raumheizungseffizienz (ETAs)	
	Systemtemperaturen von 35°C (Niedertemperaturanwendung)	Systemtemperaturen von 55°C (Mitteltemperaturanwendung)
Elektrische L/W-WP	135%	120%
Elektrische S/W-WP	150%	135%
Elektrische W/W-WP	150%	135%
Sonstige wasserführende elektrische Wärmepumpen	150%	135%
Gasbetriebene Wärmepumpen	126%	111%

Quelle: BAFA (BAFA, 2021)

Das BAFA listet alle förderfähigen elektrisch betriebenen Wärmepumpen auf (BAFA, 2021). Diese müssen durch ein nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018-03 akkreditiertes Prüfinstitut getestet worden sein. Dies gilt für alle Wärmepumpen einer Wärmeleistung bis einschließlich 50 Kilowatt mit der Wärmequelle Luft sowie weiteren Wärmepumpen mit einer Wärmeleistung bis einschließlich 100 Kilowatt (Erdwärme, Wasser, sonstige Wärmequellen), die nach normierten Verfahren geprüft werden können. In der Richtlinie für die Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen (BEG EM) wird überdies explizit die Installation einer Wärmepumpe mit einem natürlichem Kältemittel bzw. einem synthetischen Kältemittel mit einem geringen GWP empfohlen (BMWi, 2020).

1.5 Geltungsbereich

Die am deutschen Markt üblichsten Hauswärmepumpen zeichnen sich im Wesentlichen durch folgende Produktmerkmale aus, welche zur Abgrenzung des Geltungsbereichs des zukünftigen Blauen Engels empfohlen werden:

Tabelle 12: Abgrenzung des Geltungsbereiches

Merkmal zur Abgrenzung des Geltungsbereichs	Beschreibung
Produkttyp	Serienmäßig hergestellte Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern
Funktion	Raumbeheizung mit oder ohne Warmwasserbereitung

Merkmal zur Abgrenzung des Geltungsbereichs	Beschreibung
Nennwärmeleistung	Bei L/W-WP, S/W-WP und W/W-WP bis zu 70 kW für Wärmeabgabe an wasserbasierte Heizkreise (nach Norm-Nennbedingungen der DIN EN 14511-2)

Als Kriterium für den zukünftigen Blauen Engel ist die Verwendung natürlicher Kältemittel gesetzt. Als Kältemittel kommen somit Kohlenwasserstoffe (R290, R600a, R1270), CO₂ (R744) und Ammoniak (R717) in Betracht. Grundsätzlich können auch Wasser und Luft als Kältemittel verwendet werden, für Hauswärmepumpen sind sie derzeit aber nicht von Bedeutung. Der derzeitige Marktanteil natürlicher Kältemittel an der oben definierten Produktgruppe beläuft sich schätzungsweise auf 8 bis 10 Prozent.

Wärmepumpensysteme außerhalb des Geltungsbereiches

- ▶ **Reversible L/L-WP** werden für die Inventarisierung von Energieverbrauch und Kältemittlemissionen in Deutschland ausschließlich als Raumklimageräte geführt (Gschrey, Osterheld, & Kleinschmidt, 2020) und sind bereits im Geltungsbereich des Blauen Engels für „Raumklimageräte für den stationären Einsatz, DE-UZ 204 enthalten (RAL gGmbH, 2016). Sie sind somit von der Produktgruppe der Hauswärmepumpen ausgeschlossen, für die in diesem Projekt die Kriterien entwickelt werden, und werden daher im Folgenden nicht weiter betrachtet.
- ▶ **L/L-WP mit Nutzung von Abluft** als Wärmequelle (Wärmerückgewinnung zur Raumheizung) finden sich im Norden Europas und auch in den Ländern Mitteleuropas mit gemäßigttem Klima. Der Aufbau dieser Geräte unterscheidet sich grundsätzlich von den Splitklimageräten (siehe oben); sie sind innen aufgestellt und an eine zentrale Lüftungsanlage angeschlossen. Der Einsatz erfolgt vorrangig im Fertighausbereich und somit praktisch ausschließlich im Neubau.
- ▶ **Hybride Systeme:** Bei hybriden Systemen (auch als hybride Wärmepumpen bezeichnet) handelt es sich um ein System, in dem eine Wärmepumpe in Kombination mit fossilem Wärmeerzeuger eingesetzt wird. Für die Marktstatistik des Europäischen Wärmepumpenverbands (EHPA) wird folgende Definition verwendet: „A hybrid heat pump is the combination of a heat pump and a fossil fuel based boiler that has a controller between both heaters and is designed to be sold together under one commercial reference.“ (EHPA, 2021c). Die konventionellen Wärmeerzeuger werden so hinsichtlich der Nutzung regenerativer Energien aufgewertet, um die Ökobilanz zu verbessern. Diese Systeme sind hinsichtlich der Umweltrelevanz sehr genau zu analysieren, liefern aber ggf. Lösungen speziell in der Sanierung, wo in bestimmten Fällen die Wärmepumpe als alleinige Heizlösung an technische Grenzen stößt. Ist ein Hybrid-System neu installiert, bleibt somit für die Lebensdauer der Anlage (15 bis 20 Jahre) ein fossiles Heizsystem im Bestand, dies ist hinsichtlich der ökologischen Auswirkungen grundsätzlich kritisch zu bewerten.

Da hybride Systeme zwar eine Wärmepumpe beinhalten, aber als ein System mit einem Gas- oder Ölkessel zusammen betrachtet werden müssen, kommen sie für den Geltungsbereich des zukünftigen Blauen Engels nicht infrage.

- ▶ **Reine Brauchwasser-Wärmepumpen:** Reine Brauchwasser-Wärmepumpen nutzen meist Abluft bzw. Raumluft als Wärmequelle. Das trägt zu hoher Effizienz bei, da der Unterschied zwischen der Abluft und der zu erzielenden Warmwassertemperatur nicht so hoch ist wie bei der Nutzung von Außenluft. Die aktuelle Marktdurchdringung ist bereits recht hoch;

gewinnt aber noch an Bedeutung, da der Warmwasserbedarf quasi konstant ist im Gegensatz zum sinkenden Heizwärmebedarf im Neubau und sanierten Altbau. Sie sind für den Einsatz von natürlichen Kältemitteln gut geeignet. Aufgrund der abweichenden Bauformen und da die Leistungsprüfung und Ermittlung des Energieverbrauches anhand eines anderen Standards durchgeführt werden als bei Heizungs-WP und Kombiheizgeräten mit WP, wäre für diese Produktkategorie jedoch ein eigenes Umweltzeichen zu empfehlen.

2 Marktanalyse

Dieses Kapitel gibt einen aktuellen EU-weiten Marktüberblick, mit Fokus auf die Situation in Deutschland. Ebenso werden Marktentwicklung, Trends und Wachstumsprognosen dargestellt.

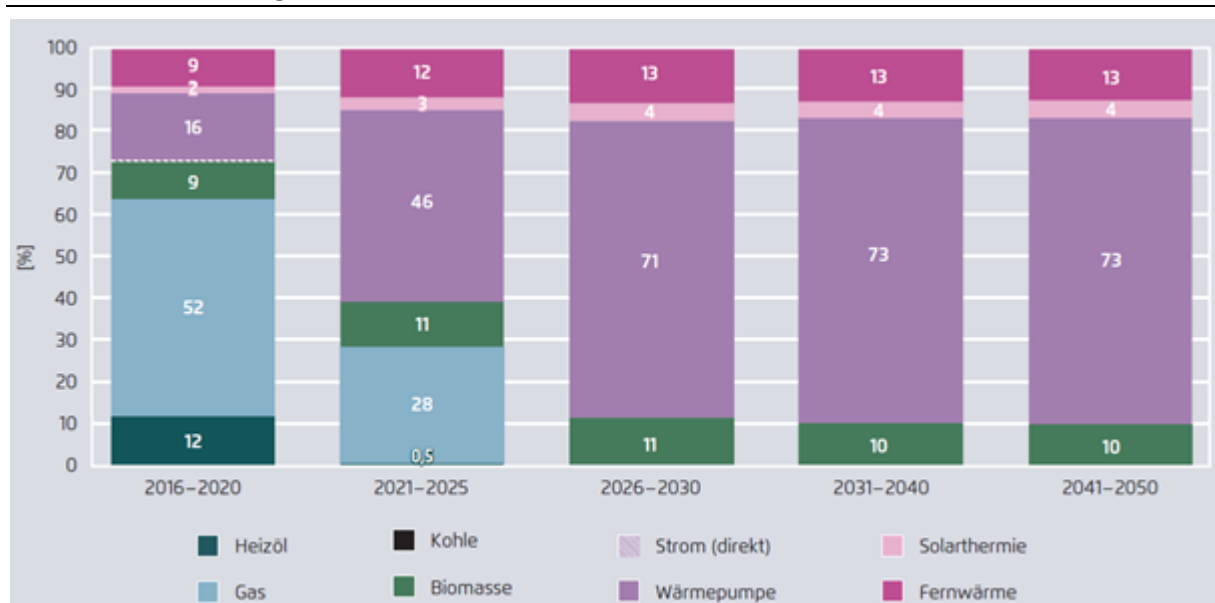
2.1 Wärmepumpen im Kontext der Dekarbonisierung des Gebäudesektors

Die EU hat sich 2021 vorgenommen, die Treibhausgasemissionen bis 2030 um mindestens 55 Prozent (im Vergleich zu 1990) zu senken. Die beschlossenen Maßnahmen sollen unter anderem dazu führen, dass der Energieverbrauch insgesamt sinkt, die Energieeffizienz und der Anteil der erneuerbaren Energien steigen und Sanierungen vorangetrieben werden. Innerhalb der EU war die Beheizung im Jahr 2017 für 28 Prozent des gesamten Energieverbrauchs verantwortlich, was 12 Prozent der gesamten Emissionen in der EU entsprach. 80 Prozent seines Gesamtenergieverbrauchs benötigte ein durchschnittlicher Haushalt in der EU zur Beheizung, wovon im Durchschnitt 75 Prozent durch fossile Energieträger bereitgestellt wurden (Zill, Olesen, & Toulouse, 2020).

Die Klimaziele Deutschlands – bis zum Jahr 2045 die Netto-Treibhausgasneutralität zu erreichen – umfassen auch explizite Ziele für den Gebäudesektor. Die in diesem Sektor maximal zulässigen Emissionen bzw. die Höhe der Emissionsminderungen im Vergleich zu 1990 sind im Bundes-Klimaschutzgesetz verankert: Sie sollen zunächst von 123,5 Millionen Tonnen CO₂ (2020) auf 67 Millionen Tonnen CO₂ (2030) sinken (UBA, 2021a).

Auch in Deutschland verursacht die Wärmeversorgung von Privathaushalten (Raumheizung und Warmwasserversorgung) mit über 80 Prozent einen Großteil von deren Endenergieverbrauch (RWI, 2020). Daher wird Wärmepumpen zur Wärmeversorgung von Wohngebäuden eine ausschlaggebende Rolle für das Erreichen von Klimaneutralität in Deutschland zugeschrieben, beispielsweise im Szenario der Agora Energiewende (Abbildung 2): Ab dem Zeitraum von 2026 bis 2030 übernehmen Wärmepumpen hier einen Anteil von über 70 Prozent an der gesamten Wärmeversorgung von Wohngebäuden. Sie übernehmen fast alle Anteile, die laut der Studie zuvor von fossilen Energieträgern bereitgestellt wurden.

Abbildung 2: Absatzstruktur der Wärmeerzeuger im Hauptszenario (Klimaneutral 2050) für Wohngebäude



Quelle: Prognos, Öko-Institut, & Wuppertal-Institut (2020)

Auch die Internationale Energieagentur hat ein Nachhaltigkeitsszenario entwickelt, bei dessen Umsetzung die Ziele des Pariser Klimaabkommens eingehalten werden können (IEA, 2020b). Weltweit decken Wärmepumpen nur fünf Prozent des weltweiten Gebäudeheizungsbedarfs ab, ihr Anteil müsste sich bis 2030 verdreifachen (IEA, 2020a). Um dies zu erreichen, sind weitere politische Unterstützung und technische Innovationen erforderlich, um die Anschaffungs- und Installationskosten zu senken, Marktbarrieren für Sanierungen zu beseitigen und die Energieleistung und Kältemittelalternativen zu verbessern (IEA, 2020a).

Der Einsatz von Wärmepumpen anstelle von Gas- oder Ölheizungen kann zur Unabhängigkeit von fossilen Brennstoffen im Gebäudesektor beitragen, wenn die benötigte elektrische Energie aus erneuerbaren Quellen kommt. Hierzu ist einerseits der Ausbau der erneuerbaren Energien wichtig, da mit steigenden Absatzzahlen der Strombedarf steigt. Andererseits können die folgenden Strategien auf Seiten der Hausbesitzer*innen unterstützen:

- ▶ Privathaushalte mit eigener Stromerzeugung aus Photovoltaik-Anlagen können ihren produzierten Strom für den Betrieb der Wärmepumpen selbst nutzen, statt ihn ins Stromnetz einzuspeisen.
- ▶ Wärmepumpen können dazu beitragen, die Stromversorgung durch intelligente Steuerung zu optimieren und unterschiedliche Spitzen bei Angebot und Nachfrage auszugleichen. Dies ist zum Beispiel möglich durch Tag-/Nacht-bedarfsgerechte Steuerung und Nutzung thermischer Speicher (Warmwasser-Speicher, Pufferung in Flächenheizungssystemen) oder Stromspeicher.

Ineffiziente oder aufgrund von falscher Auslegung ineffizient arbeitende Wärmepumpen können zu einer Erhöhung des Energiebedarfs führen und tragen nicht ausreichend zu einer Dekarbonisierung des Heizens bei.

Natürliche Kältemittel

Nur wenn natürliche Kältemittel mit sehr geringem, vernachlässigbarem Treibhauspotenzial in Wärmepumpen eingesetzt werden, stellen Wärmepumpen eine treibhausgasneutrale Methode der Wärmebereitstellung dar. Synthetische Kältemittel mit hohem GWP können bei Entweichen im Betrieb oder bei der Wartung und Außerbetriebnahme noch signifikant zum Treibhauseffekt beitragen. Zudem verursachen natürliche Kältemittel auch bei Herstellung und Recycling weniger Treibhausgas (THG)-Emissionen als fluoridierte Kältemittel (siehe Abschnitt 4.3.3.2).

Fazit: Durch den effizienten Betrieb von Wärmepumpen (hocheffiziente Wärmepumpentechnik sowie effiziente Einbindung in Heizungssysteme), gepaart mit dem Bezug von Strom aus erneuerbaren Energiequellen und dem Einsatz natürlicher Kältemittel kann die Wärmeversorgung im Wohngebäudebereich auf nahezu null THG-Emissionen gesenkt werden.

Abbildung 3: Mit Wärmepumpen zum (Nahezu-)Null-Emissionen-Heizen



Quelle: Eigene Darstellung, HEAT GmbH

2.2 Marktentwicklung von Wärmepumpen

2.2.1 Überblick des Wärmepumpenmarkts

Weltweit haben 2019 fast 20 Millionen Haushalte Wärmepumpen gekauft (einschließlich reversibler Klimageräte) (IEA, 2020a). In vielen Ländern – so auch in Deutschland (siehe Kapitel 2.2.2 und Abbildung 7) – sind Wärmepumpen mittlerweile die führende Heizungstechnik im Wohnungsneubau. Nachholbedarf besteht allerdings im Gebäudebestand.

Laut Daten des Europäischen Wärmepumpenverbands EHPA wurde 2018 ein Gesamtbestand von 11,8 Millionen installierten Wärmepumpen zur Raumbeheizung in Europa¹³ erreicht. Von den 2018 verkauften rund 1,3 Millionen Wärmepumpen waren 48 Prozent L/L-WP, gefolgt von 44 Prozent L/W-WP und 8 Prozent erdgekoppelten (S/W-WP und W/W-WP) Systemen (EHPA, 2021d).

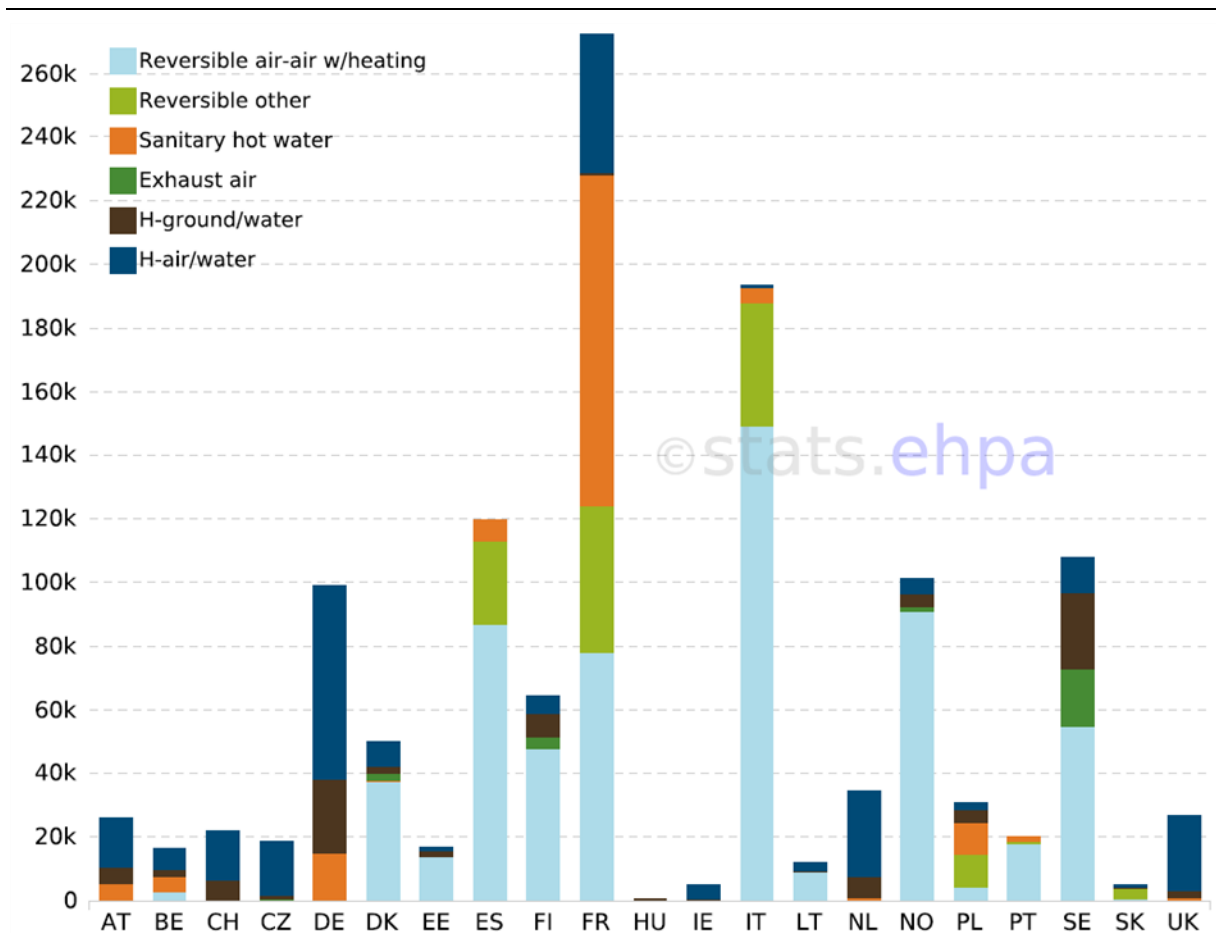
Im Jahr 2009 belief sich der Absatz noch auf 730.000 verkaufte Geräte und stagnierte in den Folgejahren. Im Zeitraum von 2009 bis 2014 verzeichnete der Absatz von Wärmepumpen zur Raumbeheizung in Europa ein jährliches Wachstum von rund 1,8 Prozent im Durchschnitt, gefolgt von deutlichem Anstieg mit einem jährlichen Wachstum von rund 12 Prozent im Zeitraum von 2014 bis 2018. Einen bemerkenswerten Anstieg verzeichnete der Absatz von Brauchwasserwärmepumpen in Europa. Dieser stieg von 29.000 Geräten im Jahr 2009 auf 161.000 im Jahr 2018 und erreichte damit einen Bestand von rund 1 Million installierten Brauchwasserwärmepumpen (EHPA, 2021d).

Der Vergleich von 21 europäischen Ländern (siehe Abbildung 4) zeigt, dass Frankreich und mit einigem Abstand Italien im Jahr 2018 die meisten Wärmepumpenverkäufe verzeichneten (reversible L/L-WP und andere reversible sowie Brauchwasserwärmepumpen einbezogen). Reversible L/L-WP dominierten 2018 auch den Wärmepumpenabsatz in Spanien, Portugal, allen skandinavischen Ländern und Irland.

In Deutschland finden dagegen L/W-WP den größten Absatz im europäischen Vergleich, gefolgt von Frankreich und mit einigem Abstand der Niederlande und Großbritannien. Österreich, die Schweiz und Tschechien stellen mit je 20.000 verkauften Stück weitere wichtige Märkte für L/W-WP dar. Ähnlich umsatzstark waren 2018 erdgekoppelte Wärmepumpensysteme (S/W-WP und W/W-WP) in Deutschland und Schweden (Nowak, 2019).

¹³ Berücksichtigte Länder: Belgien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Irland, Italien, Litauen, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Schweden, Schweiz, Slowakei, Spanien, Tschechische Republik, Ungarn

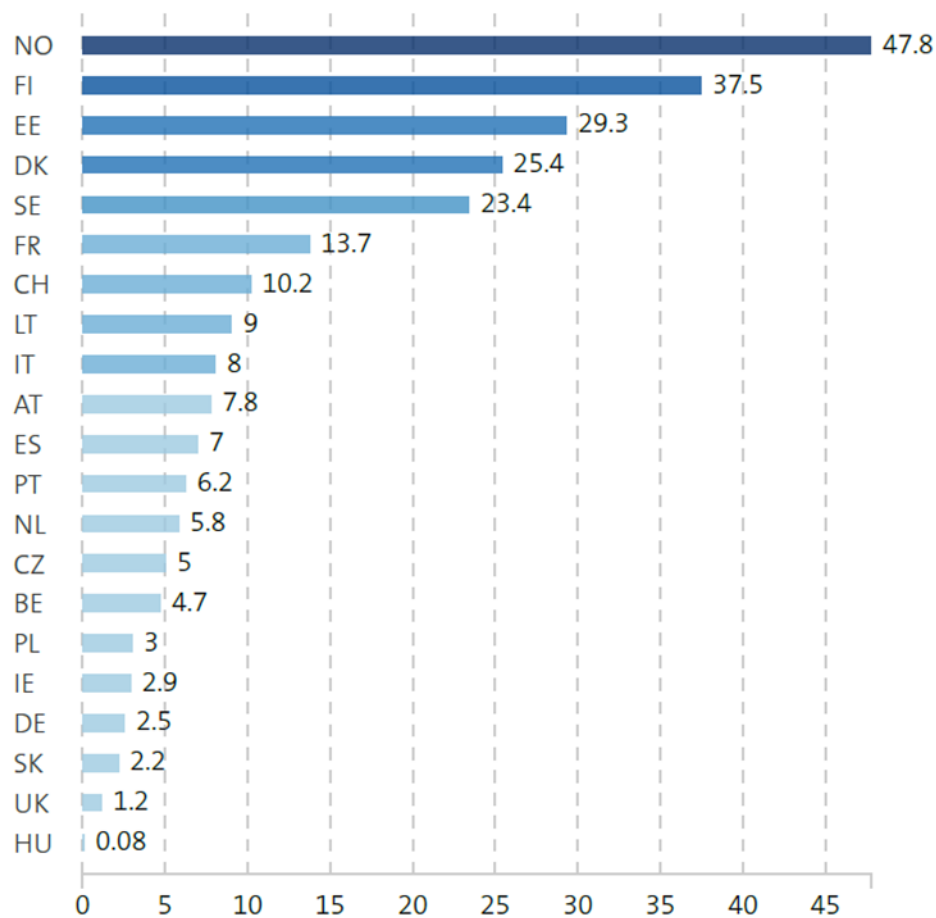
Abbildung 4: Wärmepumpenabsatz im Jahr 2018 nach Wärmepumpentyp in 21 europäischen Ländern



Quelle: EHPA (EHPA, 2021d)

Auf die Anzahl der Haushalte gerechnet führten 2019 die skandinavischen Länder und Estland Europas Wärmepumpenabsatz an: hier wurden jeweils mehr als 20 Wärmepumpen je 1000 Haushalte installiert, in Norwegen sogar 46 Wärmepumpen je 1000 Haushalte (siehe Abbildung 4). Auf die Anzahl der Haushalte bezogen lagen die Verkaufszahlen in Deutschland 2018 im unteren Bereich bei 2,5 Wärmepumpen je 1000 Haushalte, Spanien, Österreich, Italien auf mittlerem Niveau bei 6,5 bis 8 Wärmepumpen je 1000, darüber lagen noch Litauen mit 9, die Schweiz mit 9,3 und Frankreich mit 9,5 Wärmepumpen je 1000 Haushalte (EHPA, 2021d).

Abbildung 5: Wärmepumpenabsatz im Jahr 2019 je 1000 Haushalte in 21 europäischen Ländern

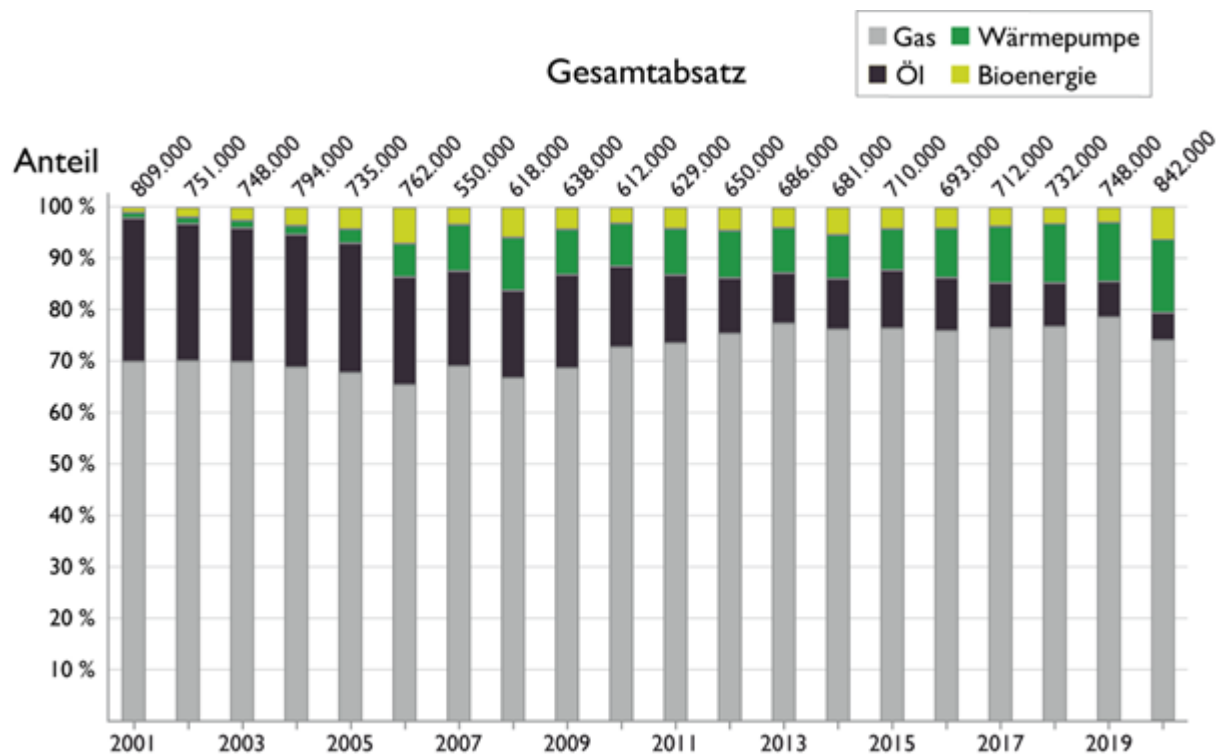


Quelle: EHPA (Nowak, 2019)

2.2.2 Wärmepumpenmarkt in Deutschland

Der Marktanteil der Heizungswärmepumpen bezogen auf den Absatz aller Wärmeerzeuger in Wohngebäuden lag in Deutschland im Jahr 2020 bei 16,7 Prozent (von 842.000 Wärmeerzeugern). Der Markt wird von Gas dominiert mit einem Gesamtanteil von rund 75 Prozent. Vom deutlichen Rückgang des Heizöl-Anteils unter den Wärmeerzeugern profitierten zunächst die Gasheizungen. Erst in den letzten Jahren konnten die Wärmepumpen diesen Trend teilweise zu ihren Gunsten drehen. Abbildung 6 zeigt den Verlauf von 2001 bis 2020 (BWP, 2021f).

Abbildung 6: Absatz der verschiedenen Wärmeerzeuger in Wohngebäuden in Deutschland von 2001 bis 2020



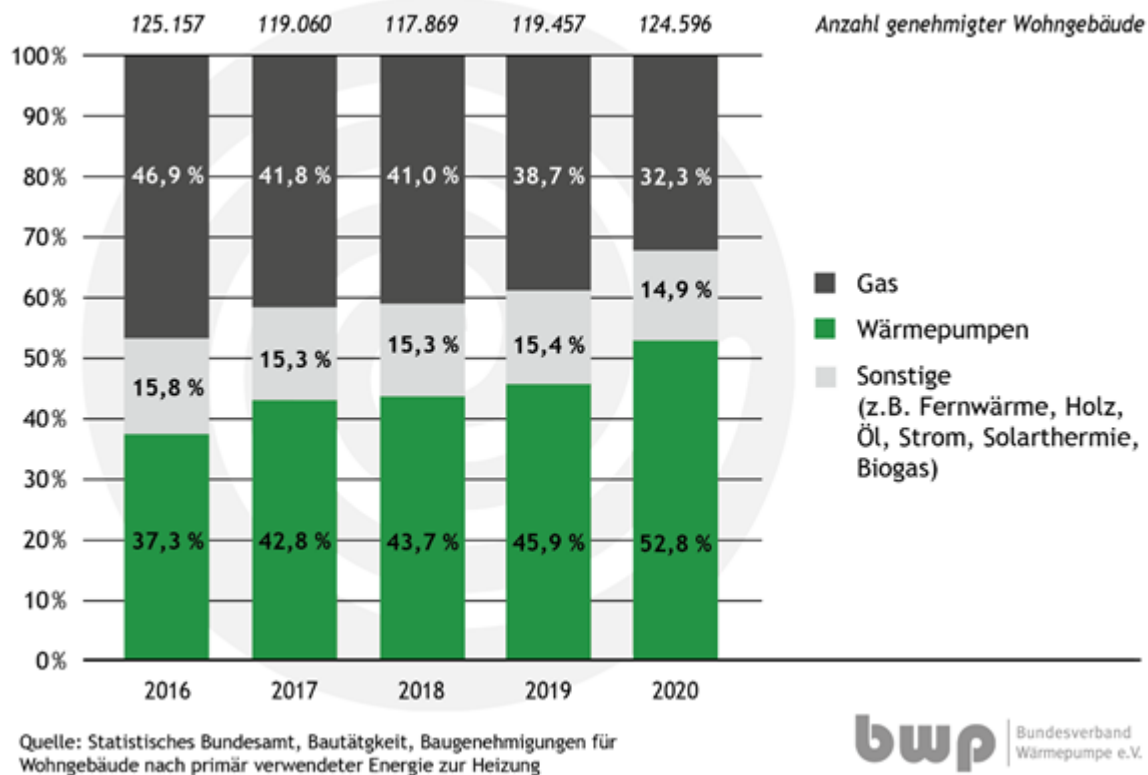
Quelle: Bundesverband Wärmepumpe (BWP, 2021f)

Im Jahr 2020 wurden Wärmepumpen erstmals in mehr als der Hälfte der Wohnungsneubauten¹⁴ eingesetzt. Ihr Anteil ist seit 2016 deutlich von 37,3 auf 52,8 Prozent gestiegen (siehe Abbildung 7) (BWP, 2021f). Im Wohnungsbestand lag der Anteil der Wärmepumpen 2019 noch bei nur 2,4 Prozent¹⁵ (BDEW, 2020).

¹⁴ Bezogen auf Baugenehmigungen neuer Wohngebäude des jeweiligen Jahres

¹⁵ Bezogen auf 42 Millionen beheizte Wohnungen

Abbildung 7: Marktanteile von Wärmepumpen im deutschen Wohnungsneubau 2016 bis 2020



Quelle: Bundesverband Wärmepumpe (BWP, 2021f)

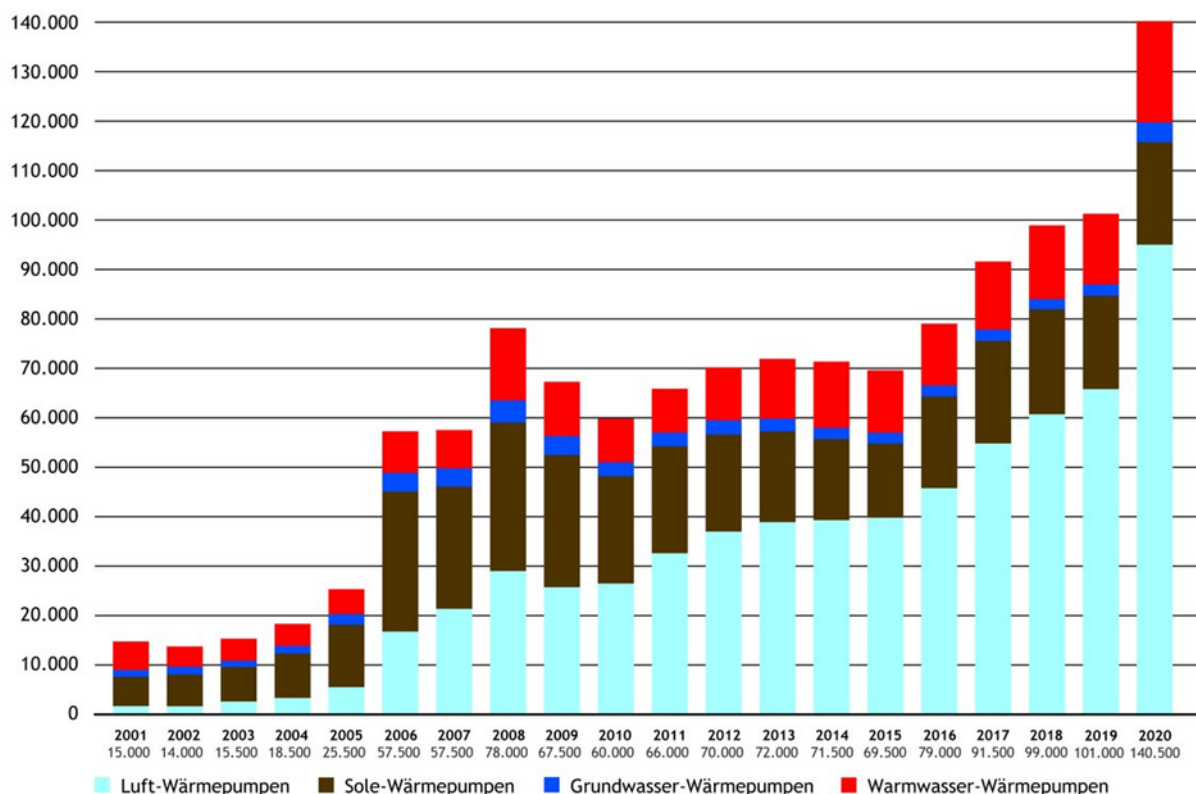
Die Marktentwicklung der Absatzzahlen aller Wärmepumpen nach Typ einschließlich Brauchwasser-Wärmepumpen über den Zeitraum von 2001 bis 2020 ist in Abbildung 8 dargestellt (BWP, 2021f). Ab 2015 ist ein deutlicher Anstieg zu beobachten; im Jahr 2019 wurden erstmals mehr als 100.000 Wärmepumpen verkauft. 2020 wurde ein Rekordabsatz von 140.500 Wärmepumpen erreicht, davon 120.000 Heizungs-Wärmepumpen.

Im Jahr 2010 löste die L/W-WP die S/W-WP als marktführende Lösung ab und konnte ihren Vorsprung seitdem stetig ausbauen. Die reine Brauchwasser-Wärmepumpe¹⁶ rangiert trotz insgesamt deutlichen Anstiegs auf Rang drei. W/W-WP¹⁷ verzeichneten über den gesamten Betrachtungszeitraum die niedrigsten Marktanteile (BWP, 2021f).

¹⁶ In Abbildung 8 als Brauchwasser-Wärmepumpe bezeichnet

¹⁷ In Abbildung 8 als Grundwasser-Wärmepumpen bezeichnet

Abbildung 8: Absatz von Heizungswärmepumpen nach Wärmequelle sowie Brauchwasser-Wärmepumpen



Quelle: BWP/BDH-Absatzstatistik

bwp Bundesverband Wärmepumpe e.V.

Quelle: Bundesverband Wärmepumpe (BWP, 2021f)

Von den insgesamt 120.000 verkauften Heizungswärmepumpen erreichten L/W-WP 2020 als umsatzstärkster Wärmepumpentyp 95.500 Verkäufe, davon 56.500 in Monoblock-Bauweise (siehe Tabelle 13). Zudem wurden 20.500 S/W-WP und 4.000 W/W-WP verkauft. Reine Brauchwasser-Wärmepumpen verzeichneten 20.500 Verkäufe im Jahr 2020. Damit stiegen die Verkaufszahlen um 24 Prozent gegenüber dem Vorjahr und um 64 Prozent gegenüber 2016 an.

Wie Tabelle 13 zeigt, ist der Wärmepumpenmarkt im Jahr 2020 gegenüber dem Vorjahr deutlich – um 39 Prozent – gewachsen. Die stärksten Typen hierbei waren L/W-WP in Monoblock-Bauweise sowie W/W-WP mit je ca. 60 Prozent. Als Unterkategorie der L/W-WP verzeichneten Split-Systeme (26 Prozent) sowie S/W-WP (17 Prozent) das niedrigste Wachstum 2020 gegenüber dem Vorjahr. Nur die erdgekoppelten Wärmepumpen waren mit minus 15 Prozent 2019 rückläufig gegenüber dem Vorjahr, während L/W-WP in Monoblock-Bauweise um 6 Prozent und alle weiteren Wärmepumpentypen um rund 10 Prozent zulegten (BWP, 2021f).

Tabelle 13: Absatz von Wärmepumpen nach Wärmequelle und Bauart

Wärmequelle	Wärmepumpen-Typ	Absatz 2019	Absatz 2020	Wachstum 2020
Erdreich	S/W-WP	17.500	20.500	+17%
	W/W-WP	2.500	4.000	+60%
	Erdreich-Wärmepumpen gesamt	20.000	24.500	+23%

Wärmequelle	Wärmepumpen-Typ	Absatz 2019	Absatz 2020	Wachstum 2020
Luft	Monoblock	35.000	56.500	+61%
	Split	31.000	39.000	+26%
	L/W-WP gesamt	66.000	95.500	+45%
	Heizungswärmepumpen gesamt	86.000	120.000	+40%
	Brauchwarmwasser	16.500	20.500	+24%

Quelle: BWP/BDH-Absatzstatistik (BWP, 2021f)

Eine Verteilung der Heizungswärmepumpen nach Größen, Typ und Aufstellungsort, bezogen auf aktuelle Verkaufszahlen (2020), ist in Tabelle 14 dargestellt. Die Anzahl der verkauften Heizungswärmepumpen lag in Deutschland bei ca. 120.000 Stück (2019: 86.000), die Zahl der Brauchwasserwärmepumpen bei ca. 21.000 Stück (2019: 16.500).

Tabelle 14: Prozentuale Marktanteile der Wärmepumpentypen in Deutschland im Jahr 2020 unterteilt nach Heizleistung

Wärmepumpentyp		L/W-WP			S/W-WP	W/W-WP	Sonstige	Gesamt
Unterkategorie		Mono-block	Mono-block	Split				
Aufstellungsart		Außen	Innen		Innen ¹⁸	Innen		
Wärmeleistung (kW)	<10	31,2%	4,4%	21,4%	10,9%	0,3%	1,3%	69,5%
	10-20	8,9%	0,9%	10,4%	5,0%	0,7%	0,6%	26,5%
	20-50	1,5%	0,1%	0,8%	1,0%	0,2%	0,1%	3,7%
	>50	-	-	-	0,3%	-	-	0,3%
	Gesamt	41,6%	5,3%	32,6%	17,2%	1,3%	2,0%	100%

Quelle: Eigene Darstellung, HEAT GmbH, auf Basis von Absatzdaten des Bundesverbands Wärmepumpe

2.2.3 Kältemittelnutzung für Hauswärmepumpen

Eine Auswertung der aktuell verfügbaren Modelle zeigt die Vielfalt und Anteile der eingesetzten Kältemittel. In Tabelle 15 ist der Anteil der Modelle pro Kältemittel an der Gesamtzahl der unterschiedlichen Modelle (nicht dem Marktanteil) zusammengestellt. Die meisten Modelle nutzen derzeit noch R410A (66,1 Prozent bei L/W-WP, 70,8 Prozent bei S/W-WP und 68,9 Prozent bei W/W-WP). Bei den L/W-WP liegt R32 an zweiter Stelle, gefolgt von R407C. Bei den S/W-WP und W/W-WP dagegen liegt R407C an zweiter Stelle, gefolgt von R134a.

4,9 Prozent der L/W-WP-Modelle nutzen das Kältemittel R290; bei den S/W-WP liegt der Anteil bei 1,4 Prozent und bei W/W-WP bei 2,2 Prozent.

Die neuen Gemische mit HFO, wie R454B und R454C, finden nur bei weniger als einem Prozent der L/W-WP-Modelle Einsatz. Das als Drop-in für R22 vermarktete R417A (ein Gemisch ohne

¹⁸ Üblicherweise innen aufgestellt. Einzelne Hersteller bieten S/W-WP mit R290 zur Außenaufstellung an. Diese sind hier mit eingerechnet.

HFO mit einem GWP von 2346) liegt mit einem Anteil von 1,18 Prozent leicht darüber. Bei S/W-WP liegt R454C bei 3,5 Prozent und R417A bei 1,1 Prozent.

Tabelle 15: Anteile der eingesetzten Kältemittel an den aktuell verfügbaren WP-Modellen

Kältemittel	Anteil		
	L/W-WP	S/W-WP	W/W-WP
R290	4,9%	1,4%	2,2%
R32	14,1%	0,2%	-
R134a	-	5,8%	5,6%
R404A	1,6%	-	0,4%
R407C	10,2%	17,2%	20,7%
R410A	66,1%	70,8%	68,9%
R417A	1,2%	1,1%	2,2%
R448A	0,4%	-	-
R449A	0,2%	-	-
R452B	0,60%	-	-
R454B	0,5%	-	-
R454C	0,2%	3,5%	-
R513A	0,1%	-	-

Stand der Recherche: Dezember 2021. Quelle: Salzburger Landesregierung (2021) und Hauteq Datenblätter

Im Auftrag des Umweltbundesamts wurde in einer vorangegangenen Studie zur Umsetzung des HFKW-Phase down in Deutschland die Nutzung von Kältemitteln in Hauswärmepumpen abgeschätzt und um Marktprognosen von 2018 bis 2030 ergänzt (Gschrey et al., 2020)¹⁹. Tabelle 16 listet die geschätzten Marktdurchdringungsraten verschiedener Kältemittel aus dieser Studie auf. Noch über 2020 hinaus wird für Neuanlagen ein relevanter Anteil von HFKW-Kältemitteln geschätzt, R410A und R407C sind jedoch bis 2025 vom Markt verschwunden. R32 wird mittelfristig eine wichtige Marktstellung eingeräumt, mit einer Marktdurchdringung von 30 Prozent im Jahr 2025, im Anschluss rückläufig mit einem Anteil von 12 Prozent im Jahr 2030. Die R410A-Ersatzkältemittel R454B, R454C und R455A nehmen laut der Prognose der Studie zukünftig die tragende Rolle ein. Es wird für 2025 eine Marktdurchdringung von 35 Prozent geschätzt, mit anschließendem Anstieg auf 50 Prozent im Jahr 2030. R290 steigt von 10 Prozent im Jahr 2020 auf 30 Prozent im Jahr 2030, R744 baut seinen Anteil im gleichen Zeitraum von unter 1 Prozent auf 3 Prozent aus.

¹⁹ In der Kategorie Wärmepumpen wurden hier L/W-WP sowie S/W-WP und W/W-WP erfasst, während L/L-WP den Raumklimageräten zugeordnet wurden.

Tabelle 16: Marktdurchdringungsraten bezogen auf Kältemittelmengen für Wärmepumpen-Neuanlagen mit Projektion bis 2030

Verwendete Kältemittel in Wärmepumpen	GWP [IPCC (2007)] / [WMO (2010)]	Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen [%]				
		2015	2018	2020	2025	2030
R410A	2088	40	45	35	0	0
R407C	1774	54	40	20	0	0
R134a	1430	6	6	0	0	0
R466A	733	0	0	0	2	2
R32	675	0	< 1	20	30	12
R513A	631	0	0	2	5	3
R454C/R455A/R454B	148/466	0	0	12	35	50
R290 (Propan)	3	0	7	10	25	30
R744 (CO ₂)	1	0	< 1	< 1	3	3

Quelle: Gschrey et al, 2020

Eigene Einschätzung der Marktanteile

Die oben genannten, prognostizierten Marktanteile können anhand der Gespräche mit Herstellern bewertet werden. Hierfür wurden die Angaben von drei der befragten Hersteller einbezogen, welche derzeit sowohl Wärmepumpen mit fluorierten Kältemitteln als auch mit R290 anbieten:

Der Marktanteil der Kältemittelgemische R454B, R454C und R455A für 2020 erscheint überbewertet, genauso die Prognose für 2025 und 2030. Die befragten Hersteller gaben an, dass sie die HFO-Gemische aktuell nicht einsetzen. Für 2025 sah nur ein Hersteller einen Anteil von 16 Prozent am Gesamtabatz, die anderen gar keinen. Realistischer scheint die Annahme, dass diese Gemische weniger stark ansteigen und nur eine Übergangslösung darstellen. Hier wird auf die Planungsunsicherheit aufgrund von Diskussionen um HFOs als per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) und deren möglicher Beschränkung verwiesen²⁰.

- Im Gegensatz zur Prognose wird R410A nach Einschätzung der Hersteller im Jahr 2025 noch nicht vom Wärmepumpenmarkt verschwunden sein, sondern immer noch einen großen Anteil haben – im Mittel schätzen die drei Hersteller diesen Anteil für 2025 in ihrem eigenen Produktportfolio noch auf 32 Prozent.
- Die Entwicklung von R290 schätzen die Hersteller in etwa so ein, wie sie in der Studie prognostiziert wurde.

²⁰ Fünf europäische Länder (darunter Deutschland) prüfen momentan eine Einschränkung des Einsatzes von bestimmten Kältemitteln und ihren Abbauprodukten als PFAS unter der REACH-Verordnung. Das führt zu Verunsicherung bei Herstellern von Kältemitteln und Kälteanlagen, inwiefern Kältemittel, die PFAS enthalten, wie die Gemische R454B und R454C, die als Alternativen mit niedrigem GWP auf den Markt gebracht wurden, langfristig eingesetzt werden können (siehe beispielsweise (P. Günther, 2020)). PFAS werden in der Atmosphäre und in Ökosystemen nicht abgebaut und können die Gesundheit gefährden. Das UBA vertritt daher aus Vorsorgegründen die Position, dass diese Stoffe in der EU verboten werden oder nur für zwingend notwendige Anwendungen erlaubt bleiben sollten (UBA, 2020).

- R32 wird dagegen auch nach 2025 noch steigen, da es insbesondere für den recht großen Anteil der Split-L/W-WP-Systeme in Betracht kommt.

2.2.4 Wesentliche Marktakteure und Produzenten

Der deutsche Wärmepumpenmarkt wird bestimmt von einigen namhaften globalen Herstellern aus Südostasien, zahlreichen etablierten deutschen Herstellern sowie Herstellern aus Skandinavien und Österreich. Eine Vielzahl der deutschen und anderer europäischer Wärmepumpenhersteller ist bereits seit Jahrzehnten mit anderen Heizsystemen am Markt vertreten. Daneben sind auch einige Unternehmen vertreten, die sich von Beginn an auf Wärmepumpen spezialisiert haben oder über andere Geschäftszweige die Herstellung von Wärmepumpen erschlossen haben. Innerhalb dieser spezialisierten Unternehmen finden sich einige Wärmepumpenhersteller, die sich auf bestimmte Bauarten beschränken. Insgesamt bieten die meisten Wärmepumpenhersteller am deutschen Absatzmarkt jedoch ein breites Spektrum an Wärmepumpenbauarten und Leistungsbereichen an. Modulierende Verdichter (Inverter-Systeme) wie auch reversible Wärmepumpen mit aktiver Kühlfunktion werden zunehmend angeboten. Reversible L/L-WP drängen vor allem durch internationale Hersteller aus Südostasien auf den deutschen Markt.

Hersteller von Hauswärmepumpen werden in Deutschland durch den Bundesverband Wärmepumpe (BWP) repräsentiert, europaweit durch den Europäischen Wärmepumpenverband (European Heat Pump Association, kurz EHPA). Die Interessen der Hersteller von Wärmepumpen größerer Leistungsklassen vertritt in Deutschland der Verband Deutscher Anlagen- und Maschinenbau (VDMA).

Zu den wichtigsten Herstellern von Hauswärmepumpen am deutschen Markt zählen folgende Firmen und Unternehmensgruppen (Tabelle 17):

Tabelle 17: Übersicht der wichtigsten Hersteller am deutschen Markt

Hersteller	Herkunft	Wärmepumpen mit natürlichem Kältemittel im Portfolio ²¹	Typ und Bauart
ait-Deutschland	Deutschland; Teil der NIBE-Gruppe (s.u.), vertreibt die deutschen Marken Alpha-Innotec, Novelan, Roth Werke	✓	L/W Monoblock
Bosch Thermotechnik	Deutschland; einschließlich der Marken Buderus, Junkers		
BDR Thermea -	Niederlande; einschließlich der deutschen Marke Brötje sowie Remeha		

²¹ Angabe soweit feststellbar anhand aktueller Recherchen der jeweiligen Internetseiten und Herstellergesprächen

Hersteller	Herkunft	Wärmepumpen mit natürlichem Kältemittel im Portfolio ²¹	Typ und Bauart
Daikin	Japan, einschließlich der deutschen Marke Rotex		
ELCO	Schweiz; Teil der italienischen Ariston Thermo-Gruppe		
Fujitsu	Japan		
GD Midea Heating & Ventilating	China		
Glen Dimplex	Teil von Dimplex, Irland	✓	L/W Monoblock
Hautec	Deutschland	✓	L/W Monoblock S/W Innenaufstellung W/W Innenaufstellung
Hoval	Liechtenstein	✓	L/W Monoblock
IDM Energiesysteme	Österreich	✓	L/W Monoblock
LG Electronics	Südkorea		
Mitsubishi Electric	Japan		
NIBE	Schweden	✓	L/W Monoblock
Ochsner	Österreich		
Panasonic	Japan		
Samsung	Südkorea		
Stiebel Eltron	Deutschland; einschließlich Marke Tecalor		
Swegon	Schweden		
Thermia	Schweden		
Vaillant	Deutschland	✓	L/W Monoblock
Viessmann	Deutschland		L/W Monoblock
Waterkotte	Deutschland		
Weishaupt	Deutschland		
Wolf	Deutschland	✓	L/W Monoblock

Quelle: Eigene Recherche, HEAT GmbH, Stand August 2021

Auer (Frankreich) ist ein weiterer Wärmepumpenhersteller im europäischen Markt. Auer hat nur natürliche Kältemitteln im Portfolio, hat derzeit jedoch keine nennenswerten Marktanteile

am deutschen Markt und bislang keine Wärmepumpenreihen bei BAFA zur Förderfähigkeit angemeldet.

Des Weiteren gibt es einige kleinere Wärmepumpenhersteller mit hoher Innovationskraft und Marktanteilen von Hauswärmepumpen in Deutschland, darunter Heliotherm und das Start-up Lambda (beide Österreich) sowie ecoforest (Spanien) und HKS Lazar SP (Polen). Die drei zuletzt genannten bieten nur Wärmepumpensysteme mit natürlichem Kältemittel an. Tabelle 18 bietet einen Überblick über die verfügbaren Typen. Skadec (Deutschland) vertreibt ebenfalls Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln, mit Fokus auf größere Leistungsbereiche.

Tabelle 18: Hersteller von R290 Wärmepumpen mit geringen Marktanteilen in Deutschland

Hersteller	Herkunft	Typ und Bauart
Heliotherm	Österreich	S/W Außenaufstellung
Lamda	Österreich	L/W Monoblock
HKS Lazar SP. z o.o.	Polen	L/W Monoblock
Auer	Frankreich	L/W Monoblock
Ecoforest	Spanien	L/W Innenaufstellung L/W Außenaufstellung S/W Innenaufstellung

Quelle: Eigene Recherche, HEAT GmbH

Tabelle 19 zeigt die verfügbaren R-290-Wärmepumpen nach Heizleistung und Typ. Hierbei wurden nur serienmäßig hergestellte Produkte betrachtet. Die meisten R290-Wärmepumpen gibt es in der Kategorie L/W mit Monoblock Außenaufstellung mit einer Leistung von unter 10 Kilowatt. Dies entspricht sowohl dem größten Marktanteil von Wärmepumpen insgesamt (knapp über 30 Prozent, siehe auch Tabelle 14) als auch der Möglichkeiten der technischen Umsetzung mit höheren Füllmengen und geringeren Sicherheitsanforderungen in der Außenaufstellung. Auch in der höheren Leistungsklasse bis 20 Kilowatt sind Produkte verfügbar (ca. 9 Prozent des Marktes). Für die Innenaufstellung gibt es bei L/W-WP bis 10 Kilowatt ein Produkt mit unterschiedlichen Leistungen am Markt. Hier sind die Standards restriktiv und fordern kostspielige Sicherheitsmaßnahmen. Wärmepumpen mit größeren Leistungen, die dementsprechend auch höhere Kältemittelmengen fordern, sind serienmäßig nicht verfügbar.

Split L/W-WP sind aufgrund der zugelassenen Mengen an brennbaren Kältemitteln nicht verfügbar. Dies sind momentan ca. 30 Prozent des gesamten Wärmepumpenmarktes, die nicht abgedeckt werden können.

S/W- und W/W-WP gibt es sowohl in den Leistungsklassen unter 10 Kilowatt und 10 bis 20 Kilowatt. Hier ist vor allem ein Hersteller aktiv, der sich auf die Innenaufstellung spezialisiert hat. Ein weiterer Hersteller bietet S/W-WP auch in der Außenaufstellung an. Gemeinsam stellen diese Kategorien ca. 18 Prozent des Marktes.

Insgesamt sind R290-Wärmepumpenmodelle verfügbar, die 60 Prozent des Wärmepumpenmarktes abdecken können.

Tabelle 19: Verfügbarkeit von Propan-Wärmepumpen nach Heizleistung und Typ

Wärmepumpentyp		L/W-WP			S/W-WP	W/W-WP
Unterkategorie		Monoblock	Monoblock	Split		
Aufstellungsart		Außen	Innen		Innen ²²	Innen
Wärmeleistung (kW)	<10	X	X	-	X	X
	10-20	X	-	-	X	X
	20-50	-	-	-	-	-
	>50	-	-	-	-	-

Quelle: Eigene Darstellung, HEAT GmbH, auf Basis von Herstellerdaten

2.3 Einflussfaktoren auf die Marktentwicklung

Die Entwicklung des Wärmepumpenmarktes wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst. Hier spielen insbesondere Gesetzgebung und Förderprogramme, die Betriebskosten sowie die Verfügbarkeit von qualifizierten Fachkräften für Planung und Einbau eine Rolle. Für die Verbreitung von Wärmepumpen mit brennbaren Kältemitteln sind zusätzliche technische Anforderungen relevant. Diese Faktoren werden im Folgenden beschrieben.

Ein Blick ins Nachbarland Frankreich

Der französische Wärmepumpenverband (AFPAC) vermeldete für 2018 einen Bestand von 3,2 Millionen installierten Wärmepumpen in Einfamilienhäusern (einschließlich Brauchwasserwärmepumpen). Hier werden die seit 2008 nahezu flächendeckende Produktzertifizierung aller Wärmepumpen (obligatorisches Werksaudit) sowie die Sicherstellung der Qualität bei Installation und Wartung durch umfassende Schulung und Zertifizierung von Installateuren (Programm QUALIPAC, bereits 8.000 zertifizierte Installateure) als wesentliche Hilfsinstrumente gesehen. Zudem existiert in Frankreich eine attraktive Auswahl an Finanzierungs- und Subventionierungsmodellen sowie Co-Finanzierungsangeboten mit Energieversorgungsunternehmen zur Anschaffung von Wärmepumpen im Zuge der Modernisierung, welche von den Endverbrauchern*Endverbraucherinnen angenommen werden (Laplagne, 2019).

2.3.1 Gesetzgebung und Förderprogramme zum Erreichen der Klimaziele im Gebäudesektor

Um die Klimaziele im Gebäudesektor zu erreichen, muss der Anteil der Wärmepumpen am Gesamtabsatz der Wärmeerzeuger (und damit im Gebäudebestand) deutlich steigen (siehe Kapitel 2.1). Bei niedrigen Vorlauftemperaturen entfaltet die Wärmepumpe ihr Potenzial und arbeitet besonders energieeffizient, da die Wärme mit dem niedrigsten elektrischen Energieeinsatz bereitgestellt wird.

Für Neubauten gelten seit November 2020 bestimmte Anforderungen an die Isolierung und den maximalen Primärenergiebedarf als Teil des Gebäudeenergiegesetzes (GEG). Unter diesen Bedingungen können Wärmepumpen sehr wirtschaftlich betrieben werden, was für Eigentümer*innen einen starken Anreiz bietet.

²² Üblicherweise innen aufgestellt. Einzelne Hersteller bieten S/W-WP mit R290 zur Außenaufstellung an. Diese sind hier mit eingerechnet.

Um den Einsatz von Wärmepumpen zu fördern bzw. den Wechsel von Gas- oder Ölkesseln zum System Wärmepumpe zu erleichtern, sind Förderprogramme geeignet, die

1. **hohe Anforderungen an die Energieeffizienz von Neubauten stellen:** Im Neubau steigt die Zahl der Wärmepumpen (siehe Abbildung 7). Dies wird begünstigt durch den geringeren spezifischen Heizbedarf von gut gedämmten Neubauten und dem Trend zu Heizungsverteilsystemen mit niedrigen Vorlauftemperaturen. Die Planung und Ausführung solcher Systeme sind im Neubau deutlich einfacher als in Bestandsgebäuden.
2. **die energetische Sanierung unterstützen:** Sanierungsmaßnahmen, die den Einbau einer Wärmepumpe begünstigen da sie den Wärmebedarf reduzieren und somit den wirtschaftlichen Betrieb einer Wärmepumpe gewährleisten, sind verbesserte Wärmeisolierung, niedrigere Vorlauftemperaturen (zum Beispiel durch Flächenheizungen) sowie Anlagenoptimierung bzw. Steuerungsoptimierung der Heizungsanlage.

Die BEG-Förderung (siehe Kapitel 1.4.4) enthält Programme, die sowohl für Neubauten als auch für die Sanierung von Bestandsbauten starke finanzielle Anreize setzen und damit den Absatz von Wärmepumpen erhöhen.

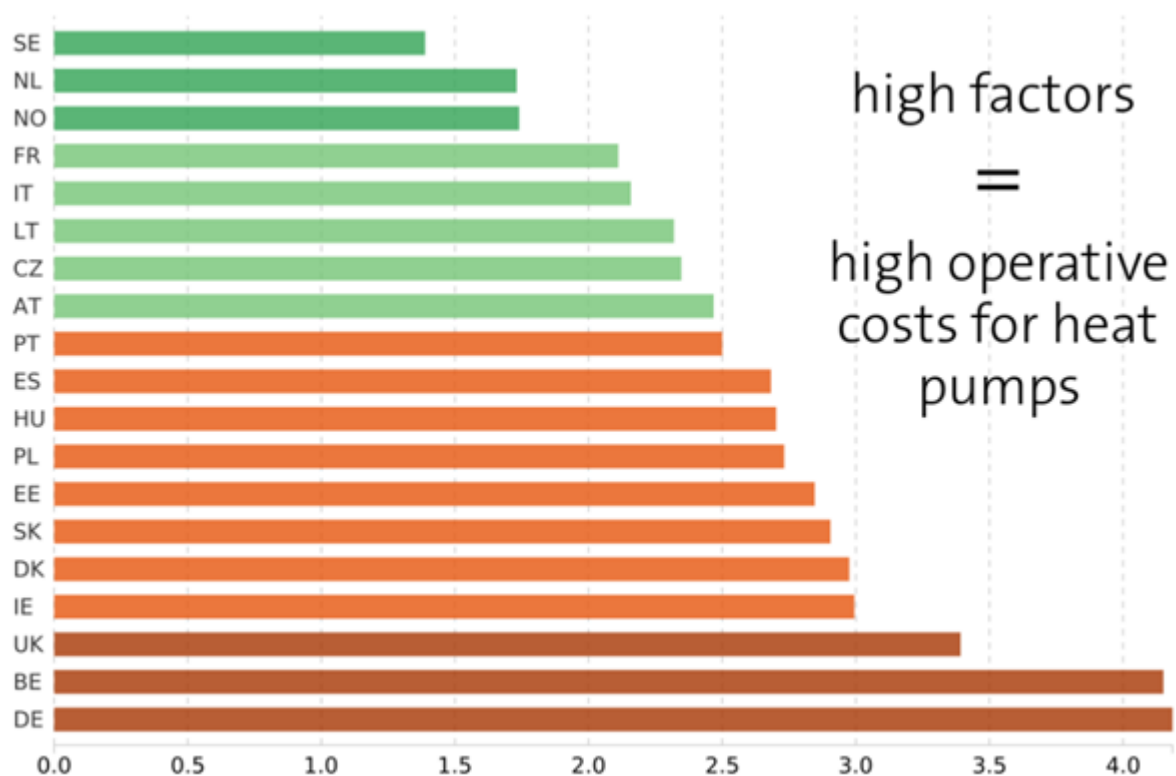
Bei der Sanierung spielt die Nutzung qualifizierter Energieberatungen und die Erstellung individueller Sanierungsfahrpläne eine tragende Rolle, welche ebenfalls gefördert wird.

2.3.2 Betriebskosten für Verbraucher

Einer der wichtigsten Einflussfaktoren auf den Wärmepumpenmarkt sind die Betriebskosten einer Wärmepumpe im Vergleich zu denen einer Gas- oder Ölheizung. Ob sich eine Wärmepumpe für Verbraucher*innen finanziell lohnt, ist abhängig von der Höhe des Strompreises im Vergleich zu Gas- und Ölpreisen.

Ein im Verhältnis zu Gas günstiger Strompreis begünstigt die Ausgangssituation für den Absatz von Wärmepumpen. Abbildung 9 zeigt das Verhältnis der Endverbraucherpreise zwischen Strom und Gas in europäischen Ländern. In Schweden, den Niederlanden und Norwegen ist der Strompreis recht eng an den Gaspreis angeglichen und begünstigt somit den Einsatz von Wärmepumpen für die Wärmeversorgung. In Deutschland und Belgien jedoch liegt der Strompreis bei mehr als dem Vierfachen des Gaspreises und beschränkt somit die Wirtschaftlichkeit des Wärmepumpenbetriebs (Nowak & Westring, 2019) durch hohe Betriebskosten für die Nutzer*innen.

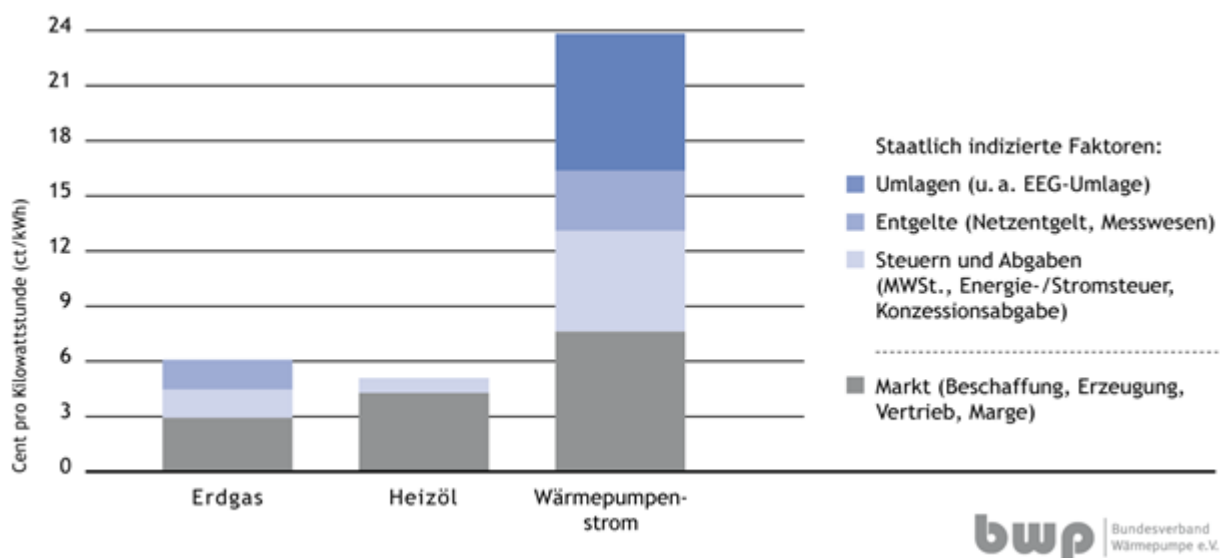
Abbildung 9: Relativer Endverbraucher-Strompreis im Vergleich zum Gaspreis



Quelle: BWP (Nowak & Westring, 2019)

Derzeit liegt der Energiepreis für Erdgas zum Heizen bei ca. 6 Cent pro Kilowattstunde, während der Wärmepumpenstrom bei ca. 24 Cent pro Kilowattstunde liegt. Wärmepumpenstrom kostet somit das Vierfache von Erdgas, obwohl der Marktpreis (Beschaffung, Erzeugung, Vertrieb und Marge) für Strom durchaus wettbewerbsfähig mit den fossilen Energieträgern ist, wie Abbildung 10 verdeutlicht. Der Marktpreis macht nur einen Bruchteil des Endenergiepreises aus; fast zwei Drittel des Endenergiepreises für Strom setzen sich aus staatlich indizierten Faktoren zusammen: Umlagen (u.a. EEG-Umlage zur Finanzierung des Ausbaus der Erneuerbaren Energien), Entgelte (Netzentgelt und Messwesen) sowie Steuern und Abgaben. Für Erdgas hingegen wird der Endenergiepreis mit rund 50 Prozent staatlich indizierten Faktoren beaufschlagt (BWP, 2021f).

Abbildung 10: Zusammensetzung der Energieträgerpreise im Jahr 2020



Quelle: Bundesverband Wärmepumpe (BWP, 2021f)

Das Wachstum des Wärmepumpenmarktes wird gehemmt durch den hohen Strompreis im Vergleich zu Gas- und Ölpreisen. Wärmepumpenhersteller fordern daher politische Maßnahmen zur Entlastung des Strompreises, eine Ausrichtung der Energiepreise am CO₂-Ausstoß und langfristige Kalkulierbarkeit der Betriebskosten, um Nutzer*innen Sicherheit zu bieten, dass sich ihre Investition in eine Wärmepumpe auch jetzt schon lohnt (BWP, 2021a). Ein Wegfall allein der EEG-Umlage könnte den Betrieb von Wärmepumpen im Vergleich zu Gaskesseln wirtschaftlich machen (Mauch & Greif, 2021). Die zukünftig stärkere CO₂-Bepreisung wird dazu führen, dass Kosten für Öl und Gas zum Heizen stärker ansteigen als für Strom. Der momentan beschlossene Anstieg des CO₂-Preises auf 55 Euro pro Tonne wird jedoch noch keine deutliche Veränderung des Verhältnisses von Strom- und Gaspreis herbeiführen (Mauch & Greif, 2021).

2.3.3 Handwerkskapazitäten

Einige der für dieses Projekt befragten Hersteller betonten, dass die Entscheidung für eine Wärmepumpe wesentlich von dem*der Heizungsinstallateur*in bzw. dem*der Energieberater*in beeinflusst wird. Auch hier würde es die Beratung „zur Wärmepumpe“ begünstigen, wenn hinsichtlich der Betriebskosten längerfristige Aussagen gemacht und eine Wirtschaftlichkeit zugesichert werden könnte (siehe Betriebskosten, Kapitel 2.3.2).

Als Herausforderung für die zur Erreichung der Klimaziele notwendige Zunahme von Wärmepumpeninstallationen wird auch die dafür erforderliche Anzahl an qualifizierten Betrieben und Handwerkern*Handwerkerinnen genannt. Je später ein massiver Technologiewechsel (durch bessere Förderung und günstigere, planbare Betriebskosten) initiiert wird, desto mehr Wärmepumpeninstallationen werden theoretisch pro Jahr notwendig sein, um die Klimaziele im Gebäudesektor noch zu erreichen, was dann in der Konsequenz zu noch stärkeren Engpässen führen würde. Der BWP gibt an, dass zusätzliche Handwerkskapazitäten erforderlich sein werden und die Wärmepumpeninstallationen stärker außerhalb der Heizperiode und über das ganze Jahr gestreckt stattfinden müssen (BWP, 2021a). Diese Streckung würde begünstigt, wenn Förderungen und Energiepreise einen Austausch alter Gas- oder Ölkessel attraktiver darstellen und Heizungsbauer*innen und Energieberater*innen darauf aufbauend vorausschauend beraten und Hausbesitzer*innen so auch außerhalb der Heizperiode neue Wärmepumpen einbauen ließen.

Gleichzeitig hat die Branche einen Generationenwechsel zu bewältigen und sieht Chancen darin, den Beruf des Heizungsbauers durch Themen wie Erneuerbare Energien und Digitalisierung sowie die Aussicht auf sichere Beschäftigungsverhältnisse in einem Wachstumsmarkt attraktiver zu machen (BWP, 2021a).

2.3.4 Einflussfaktoren in Zusammenhang mit Kältemitteleigenschaften

Da der Einsatz von HFKW als Kältemittel durch die gesetzlich vorgeschriebene Reduktion von F-Gasen (Kapitel 1.3.2.1) zunehmend eingeschränkt wird, richten Hersteller sich stärker auf die Nutzung von Kältemitteln mit geringem GWP aus. Dadurch werden zunehmend brennbare Kältemittel eingesetzt. Dazu zählen sowohl die Gemische R455A, R454B und R454C (eingestuft gemäß DIN EN 378-1 als „A2L“, also geringe Entflammbarkeit) als auch reine Kohlenwasserstoffe wie R290 (eingestuft als „A3“, also hohe Entflammbarkeit).

Diese Entwicklung kann gehemmt oder begünstigt werden durch folgende Faktoren:

- Handwerker*innen benötigen entsprechendes Fachwissen zum sicheren Umgang mit brennbaren Kältemitteln bei der Installation, Wartung und Außerbetriebnahme von Wärmepumpen, sofern hierbei der Kältemittelkreislauf geöffnet wird (also beispielsweise eine Split-L/W-WP installiert oder deinstalliert wird, oder wenn Kältemittel nach einer Leckage nachgefüllt werden muss). Gerade im Hinblick auf die große Zahl der prognostizierten Installationen kann diese zusätzliche Anforderung an Wärmepumpeninstallateure eine Barriere darstellen.

Durch die derzeitigen Anforderungen aus den harmonisierten Normen (vorrangig DIN EN 378 und DIN EN 60335-2-40) ergibt sich eine Eingrenzung des Einsatzes brennbarer Kältemittel, insbesondere sind hiervon die A3-Kältemittel wie R290 betroffen (siehe Kapitel 1.3.1.2).

- Die Möglichkeit, **größere Füllmengen von A3-Kältemitteln** einzusetzen, würde die technische Entwicklung und die Einsatzmöglichkeiten von Wärmepumpen mit dieser Kältemittelgruppe insbesondere im Innenraum erleichtern und könnte somit auch deren **Akzeptanz** bei Herstellern, Installateuren*Installateurinnen und Endverbrauchern*Endverbraucherinnen stärken. Mit größeren Füllmengen kann leichter eine höhere Energieeffizienz erreicht werden, was die Entwicklungskosten der Wärmepumpe sowie ihres Betriebes reduziert.

Bessere Schalldämmung der Verdichter und Optimierung der Ventilatoren würde R290-L/W-WP entgegenkommen, wenn diese aufgrund hoher Füllmengen nur außen aufgestellt werden können (siehe Kapitel 3.4).

Im Hinblick auf zusätzliche **Anforderungen an Komponenten** (Rohre, Verbindungen, Druckbehälter etc.) sind Lösungen zwar meist technisch umsetzbar, erhöhen aber den Aufwand und damit die Kosten dieser Systeme. Da viele Komponenten für natürliche Kältemittel bislang nicht zum Standardprogramm der Lieferanten gehören, sind diese zum Teil schwer zu beschaffen und die Preise teilweise höher als für vergleichbare Komponenten für die Systeme mit herkömmlichen Kältemitteln (siehe auch Kapitel 5.3).

Darüber hinaus erfordern Hochdruckkältemittel (R744) und brennbare Kältemittel (Kohlenwasserstoffe) nach Druckgeräterichtlinie bzw. Maschinenrichtlinie ein komplizierteres **Konformitätsbewertungsverfahren** (Kapitel 1.3.1.1) und somit Zusatzaufwand, welchen Hersteller scheuen könnten.

2.3.5 Zusammenfassung der Einflussfaktoren

Die identifizierten, wesentlichen Einflussfaktoren lassen sich wie folgt zusammenfassen:

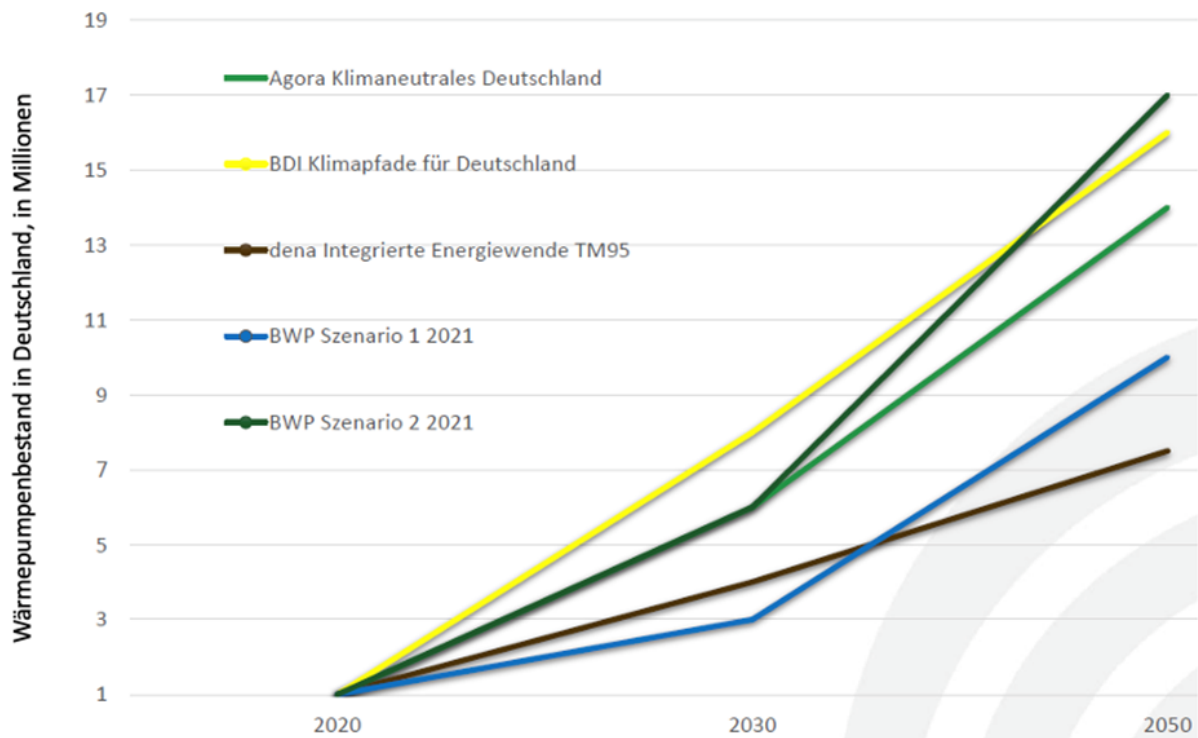
- ▶ Der Wärmepumpenmarkt profitiert momentan von Förderprogrammen für den Einbau in Neubauten sowie für Kombinationen aus Sanierung und Einbau von Wärmepumpen in Bestandsbauten.
- ▶ Der hohe Strompreis ist eine Barriere für das weitere Wachstum des Marktes, besonders im Bestand, da Wärmepumpen im Vergleich zu Gas- und Ölheizungen oft nicht wirtschaftlich betrieben werden können. Eine hohe CO₂-Bepreisung, die höher ist, als die momentan beschlossene und vor allem Gas und Öl verteuert, sowie eine Abschaffung der EEG-Umlage oder andere Reduzierung der Stromkosten, könnten den Markt positiv beeinflussen.
- ▶ Eine weitere Barriere ist gegeben durch Kapazitätsengpässe bei Handwerkern*Handwerkerinnen und Unsicherheit in der Beratung hinsichtlich der langfristigen Betriebskosten und Wirtschaftlichkeit der Wärmepumpe.
- ▶ Spezifische Barrieren für das Wachstum am Markt von Wärmepumpen mit brennbaren Kältemitteln sind die Vorgaben der Normen zur Füllmenge sowie höhere Produktionskosten durch eingebaute Sicherheitsmaßnahmen. In Fällen, in denen sich eine Innenaufstellung anbietet (aufgrund der engen Bebauung und potenziellen Lärmbelästigung der Nachbarn), haben Wärmepumpen mit nicht-brennbaren Kältemitteln dadurch bislang noch einen Vorteil.

2.4 Prognose des zukünftigen Wärmepumpenabsatzes und Wärmepumpenbestands

Kapitel 2.1 erläutert bereits, dass Wärmepumpen eine wesentliche Rolle beim Erreichen der Klimaziele spielen können. Hierzu muss der Absatz deutlich steigen. Um Treibhausgasneutralität zu erreichen, wächst der weltweite Bestand (inklusive reversibler Geräte) an Wärmepumpen im „Netto-Null-Emissionen in 2050“-Scenario der IEA von fast 180 Millionen Geräten auf einen Bestand von 600 Millionen Geräten im Jahr 2030 (IEA, 2020a).

Die folgende Darstellung des Bundesverband Wärmepumpe (BWP) stellt verschiedene Szenarien der Entwicklung des Wärmepumpenbestands in Deutschland von 2020 bis 2050 gegenüber, in der sowohl vom BWP eigens entwickelte Prognosen als auch von Agora, des Bundesverbands der Deutschen Industrie (BDI) und der Deutschen Energie-Agentur (dena) berücksichtigt sind (siehe Abbildung 11). Demnach wird im Jahr 2025 ein Bestand installierter Heizungswärmepumpen zwischen 2 und 4,5 Millionen erreicht werden, der sich bis 2030 auf 3 bis 8 Millionen Wärmepumpen erhöhen wird. Die durch Agora Energiewende beauftragte Studie „Klimaneutrales Deutschland“ fordert als Teil des Maßnahmenpakets im „Szenario Klimaneutral 2050“ zunächst bis 2030 einen Bestand von 6 Millionen Wärmepumpen und eine Erhöhung der Sanierungsrate auf 1,6 Prozent pro Jahr, um ein Zwischenziel von minus 65 Prozent der Emissionen von 1990 zu erreichen (Prognos et al., 2020).

Abbildung 11: Prognose des Wärmepumpenbestands in Deutschland bis 2050 nach verschiedenen Studien



Quelle: Bundesverband Wärmepumpe (Ehrhardt, 2020)

Nimmt man die Mittelwerte der fünf Szenarien aus der vorherigen Abbildung, würde der Bestand von 1,1 Million im Jahr 2020 auf ca. 3,2 Millionen Heizungswärmepumpen im Jahr 2025 und rund 5,4 Millionen installierte Geräte im Jahr 2030 steigen.

3 Technische Analyse

In diesem Abschnitt werden die technischen Grundlagen zum Aufbau und zum effizienten Einsatz von Hauswärmepumpen dargestellt. Die Umweltrelevanz der Wärmepumpen wird durch die eingesetzten Stoffe und den Energieverbrauch im Betrieb und Geräuschemissionen geprägt (mehr Informationen siehe nachfolgend in Kapitel 4). Darauf wird im Folgenden eingegangen.

3.1 Grundlagen zum Aufbau und Betrieb von Wärmepumpen

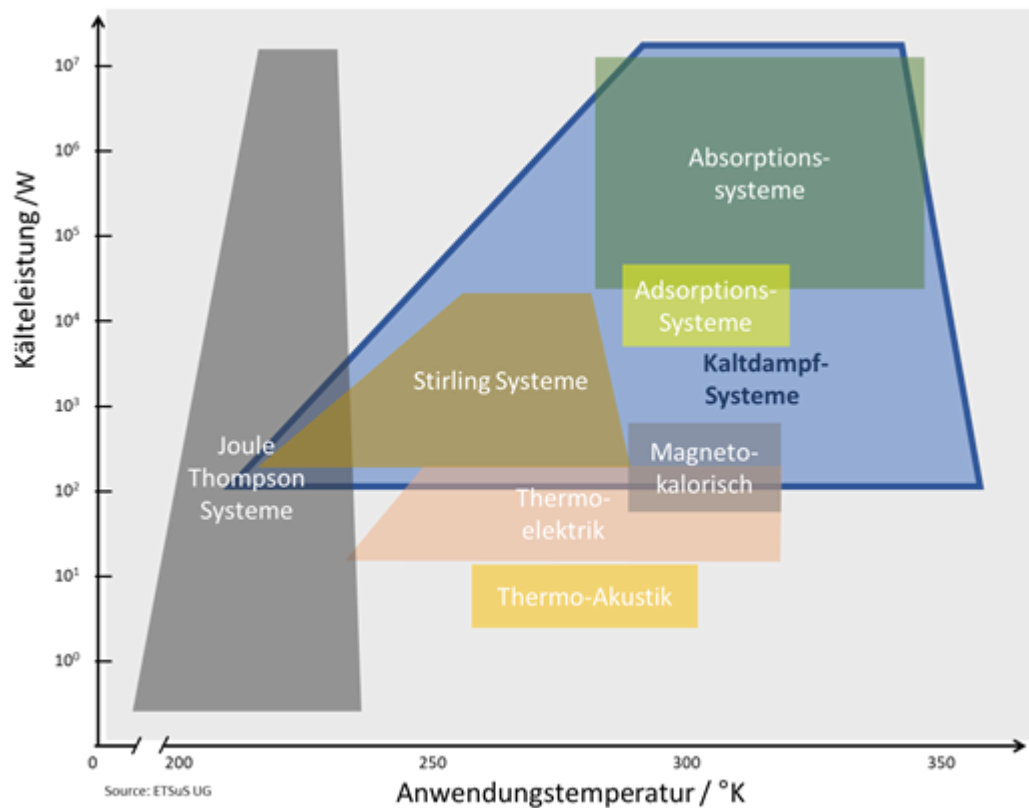
3.1.1 Wirkprinzip

Gemäß Definition (Kapitel 1) wird bei einer Wärmepumpe das Temperaturniveau einer Wärmequelle mittels eines definierten Prozesses auf ein höheres Temperaturniveau angehoben. Dieser definierte Prozess kann mittels verschiedener Wirkprinzipien und daraus abgeleiteter Verfahren und Technologien realisiert werden. Grundsätzlich sind dabei die Prozesse für Kälteanlagen und Wärmepumpen identisch.

Eine Übersicht über die verschiedenen Verfahren ist in Abbildung 12 dargestellt. Aufgrund des großen Anwendungsgebietes, gleichzeitig guter technischer Realisierbarkeit bei hoher Effizienz und daraus resultierender ökonomischer Vorteile sind Anlagen nach dem Kaltdampfsystem die mit weitem Abstand dominierende Technologie. Als Wärmepumpen spielen Ad- und Absorptionsanlagen bisher keine wesentliche Rolle. Die Gründe hierfür sind u.a. der Anlagenaufwand, die Effizienz, die notwendige Temperatur der Antriebsenergie bzw. das erforderliche Temperaturniveau für die mögliche direkte Nutzbarkeit von Abwärmequellen.

Sterling-Systeme haben sich nicht durchgesetzt bzw. sind aufgrund verschiedener Nachteile wie der Verfügbarkeit geeigneter Arbeitsstoffe und der realisierten Effizienz gegenüber den Kaltdampfsystemen nicht kommerzialisiert worden. Andere Technologien wie Magnetokalorische Systeme befinden sich im Technologie-Reifegrad (TRL, Technology Readiness Level) im Bereich von 4 (Versuchsaufbau im Labor) bis maximal 7 (Prototyp 1 bis 5 Jahre im Einsatz). Eine weitergehende Eignung für den Serienmarkt ist noch nicht absehbar. Der TRL reicht von 1 (Beobachtung des Funktionsprinzips (Grundlagenforschung) bis 9 Nachweis erfolgreicher Einsatz des qualifizierten Systems (Marktreife und -einsatz) (Schiffmann & Weickgenannt, 2018).

Abbildung 12: Einsatzbereiche verschiedener Verfahren/Wirkprinzipien für Wärmepumpen

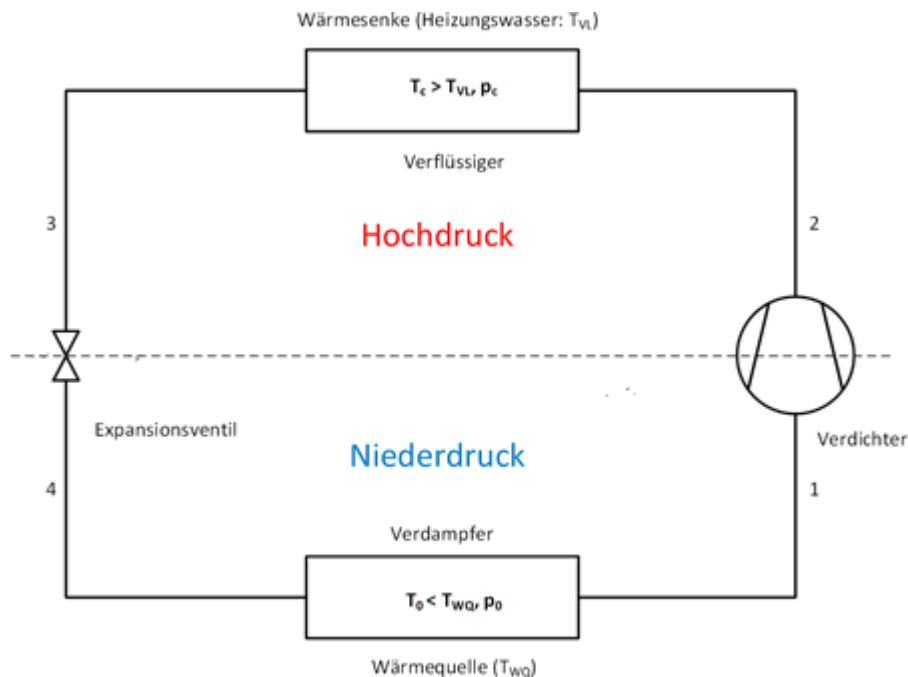


Quelle: ETSuS UG, Kulmbach

3.1.2 Grundsätzlicher Aufbau und Funktionsweise von Wärmepumpen

Der grundsätzliche Aufbau und damit auch die Grundkomponenten der aktuell sowie kurz- und mittelfristig relevanten Wärmepumpen ist durch den realisierten thermodynamischen Prozess vorgegeben (Kaltdampf-Kompression-Anlagen mit dem Carnot- (bzw. Clausius-Rankine) Vergleichsprozess). In der Wärmepumpe zirkuliert ein Kältemittel, welches die vier Hauptkomponenten, Verdichter, Verflüssiger, Expansionsventil und Verdampfer immer wieder durchläuft und auf der einen Seite Wärme aufnimmt und auf der Seite der Heizung / der Warmwassererzeugung wieder abgibt. Der grundsätzliche Aufbau einer Wärmepumpe ist im nachfolgenden Anlagenschema dargestellt (Abbildung 13).

Abbildung 13: Wärmepumpen Basis-Kreislauf



Quelle: ETSuS UG, Kulmbach

Der grundsätzliche Prozessablauf ist wie folgt: Im Verdampfer wird die Umweltwärme durch Verdampfen des Kältemittels bei niedrigem Druck p_0 aufgenommen. Die Verdampfungstemperatur T_0 liegt unterhalb der Wärmequellentemperatur T_{WQ} . Das gasförmige Kältemittel wird vom Verdichter auf ein höheres Druckniveau p_C verdichtet und dann im Verflüssiger bei hoher Temperatur T_C verflüssigt. Die Verflüssigungstemperatur liegt oberhalb der Anwendungstemperatur T_{VL} (Heizwasservorlauf oder Brauchwassertemperatur). Bei Geräten mit überkritischer Betriebsweise (R744) findet die Wärmeabgabe an die Wärmesenke im Gaskühler bei (stark) gleitenden Temperaturen ohne Phasenwechsel statt. Das Expansionsventil entspannt das Kältemittel wieder auf den Verdampfungsdruck. Die Anwendungstemperaturen und Wärmequellentemperaturen geben die Temperaturniveaus im Kältemittelkreislauf vor.

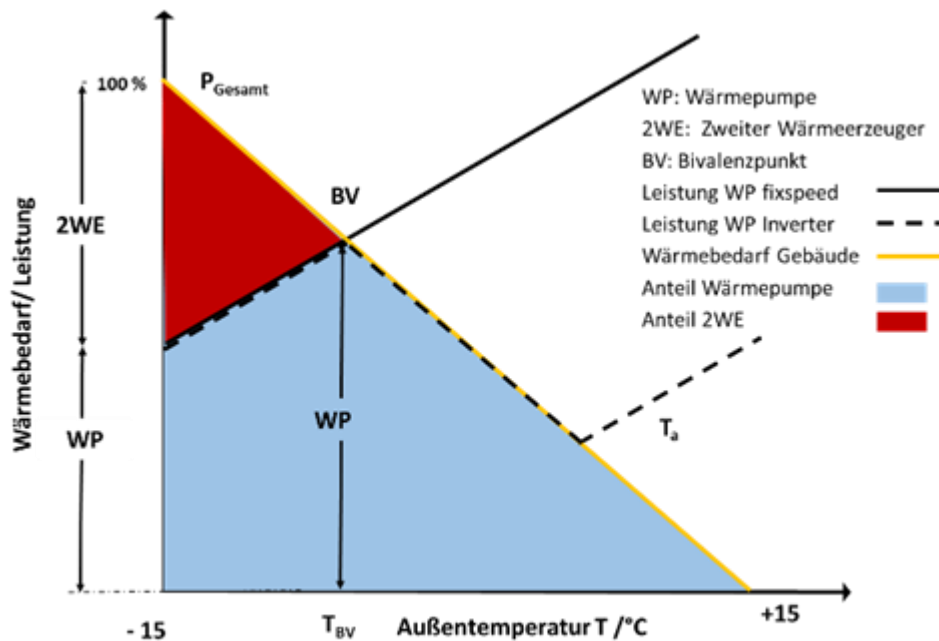
In der Praxis wird die oben gezeigte Grundkonfiguration durch verschiedene Komponenten ergänzt; Anlagenschaltungen können erweitert werden. Gründe sind z. B. die Betriebsweise (bspw. Kreislaufumkehr zum Abtauen und zum Kühlbetrieb), die Erweiterung der Einsatzgrenzen (Zwischeneinspritzung) oder auch die Effizienz bzw. durch den Einsatz von inneren Wärmeübertragern.

3.1.3 Betriebsweisen

Der Wärmebedarf eines Gebäudes und die Leistung der Wärmepumpe haben einen unterschiedlichen Verlauf. Der Wärmebedarf eines Gebäudes steigt mit sinkender Außentemperatur, während die Leistung der Wärmepumpe sinkt, insbesondere bei Nutzung von Außenluft als Wärmequelle. Der grundsätzliche Zusammenhang ist in der Abbildung 14 skizziert. Würde die Wärmepumpe für den maximalen Heizwärmebedarf des Hauses ausgelegt, so wäre diese im Verlauf der Heizperiode deutlich überdimensioniert. Die Anzahl der Heizstunden im Jahr mit sehr niedrigen Außentemperaturen ist sehr gering. Für durchschnittliche klimatische Verhältnisse nach Verordnung (EU) Nr. 811/2013 „Energiekennzeichnung von Raumheizgeräten“ (EU, 2013a) beträgt der Anteil der Heizstunden bei -5 °C und kälter nur 3,4 Prozent der gesamten Jahresheizstunden (4.910 Stunden). Daher

wird die Wärmepumpe abhängig vom Wärmepumpentyp und den Einsatzbedingungen üblicherweise auf den sogenannten Bivalenzpunkt ausgelegt: Bis zum Bivalenzpunkt wird der gesamte Wärmebedarf des Gebäudes von der Wärmepumpe abgedeckt. Bei kälteren Außentemperaturen trägt je nach Betriebsart ein zweiter Wärmeerzeuger zur Deckung des Wärmebedarfes bei oder übernimmt die Deckung vollständig. Bei Einsatz eines zweiten Wärmeerzeugers auf fossiler Basis entspricht dies prinzipiell einer Hybridwärmepumpe.

Abbildung 14: Heizwärmebedarf des Gebäudes und Leistung Wärmepumpe in Abhängigkeit der Außentemperatur und Bivalenzpunkt



Quelle: ETSuS UG, Kulmbach

Es wird zwischen folgenden Betriebsweisen einer Wärmepumpe unterschieden:

1. **Monovalenter Betrieb:** Der gesamte Wärmebedarf wird über die komplette Heizperiode ausschließlich von der Wärmepumpe gedeckt. Diese Betriebsart ist für Niedertemperaturheizsysteme geeignet (findet aber in Klimaregionen wie in Deutschland kaum praktische Anwendung in L/W-WP, da die Wärmepumpe dann überdimensioniert wäre) und ggf. auch für S/W- oder W/W-Wärmepumpen bei höheren/mittleren Temperaturniveaus.
2. **Monoenergetischer Betrieb:** Unterhalb der Bivalenztemperatur unterstützt ein elektrischer Heizstab die Bereitstellung der Wärme. Da beide Heizsysteme elektrisch betrieben werden, wird diese Betriebsart als monoenergetisch bezeichnet. Die Wärmepumpe liefert dabei bis zu ihrer Einsatzgrenze parallel zum Heizstab Wärme. Unabhängig von der Betriebsart wird der Heizstab auch als Back-up System für den Fall einer Störung der Wärmepumpe verwendet. Der monoenergetische Betrieb entspricht einer bivalent-parallelen Betriebsweise.
3. **Bivalent-paralleler Betrieb:** Die bivalent-parallele Betriebsweise zeichnet sich dadurch aus, dass, anders als bei monoenergetischem Betrieb, die zusätzlich benötigte Energie auch durch nicht-elektrische Energieformen (fossil, solar, Biomasse etc.) bereitgestellt werden kann.

4. **Bivalent-alternativer Betrieb:** Unterhalb der Bivalenztemperatur wird der gesamte Wärmebedarf vom zweiten Wärmeerzeuger gedeckt.
5. **Bivalent-teilparalleler Betrieb:** Dies ist eine Kombination der zuvor dargestellten Betriebsweisen. Unterhalb der Bivalenztemperatur arbeiten die Wärmepumpe und der zweite Wärmeerzeuger parallel. Erreicht die Wärmepumpe ihre Einsatzgrenze, liefert der zweite Wärmeerzeuger die gesamte benötigte Energie.

3.2 Kältemittel und Materialbetrachtung

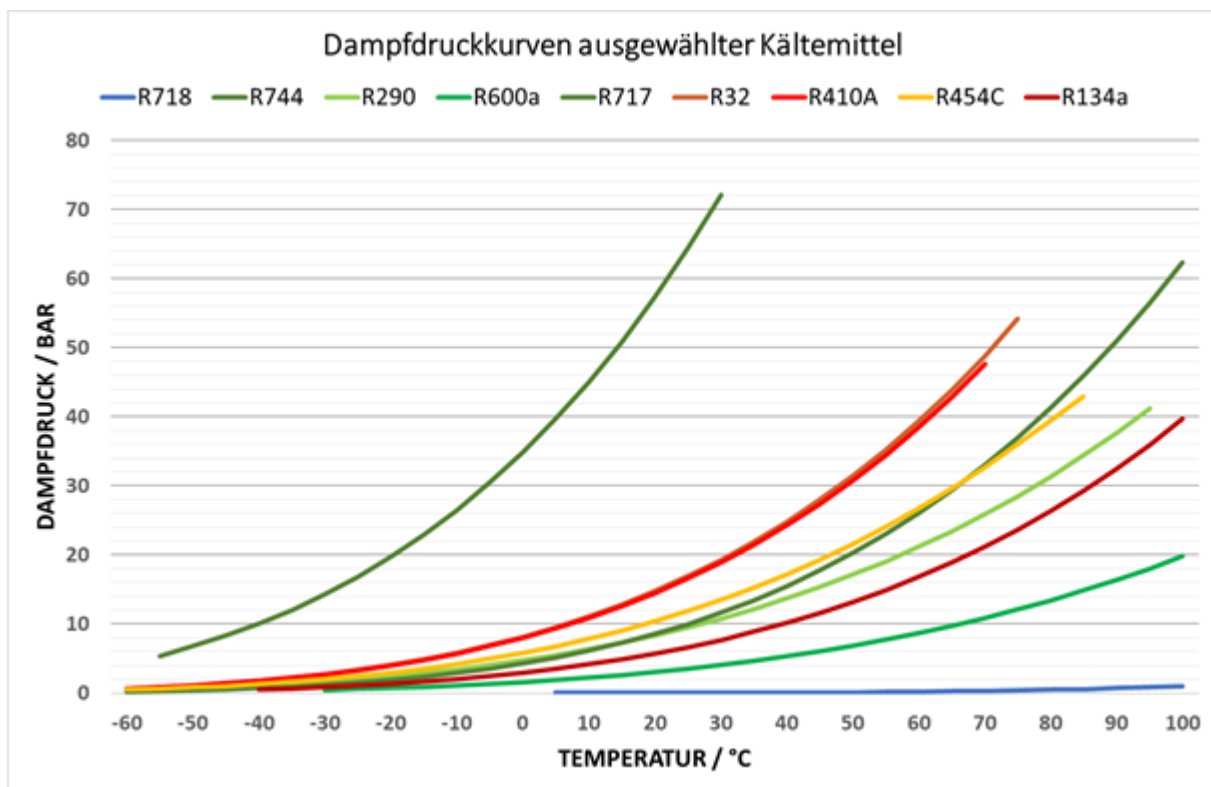
3.2.1 Kältemittel

In jeder Wärmepumpe zirkuliert ein Kältemittel im sogenannten Kältemittelkreislauf (siehe Kapitel 3.1.2). Die Benennung der Kältemittel ist fest definiert. Eine Erläuterung der offiziellen Nomenklatur befindet sich in Anhang A.

Die Eignung eines Kältemittels für den Anwendungsbereich der Hauswärmepumpen ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Bestimmte thermodynamische Eigenschaften der Kältemittel lassen eine gute theoretische Vorbewertung zu, die eigentliche Überprüfung der Eignung kann nur im praktischen Einsatz erfolgen. Eine Übersicht über wesentliche Kennwerte verschiedener Kältemittel für Wärmepumpen ist in der Tabelle 20 dargestellt.

Die grundsätzliche Eignung eines Kältemittels ergibt sich aus der Dampfdruckkurve und den Eckpunkten Normalsiedetemperatur und kritischer Punkt. Die Normalsiedetemperatur ist die Verdampfungstemperatur bei 1,013 bar, sie sollte unterhalb der Wärmequellentemperatur liegen. Der kritische Punkt lässt eine Abschätzung der zu erwartenden Drücke auf der Wärmesenkenseite zu. Der Energiebedarf (Antriebsenergie des Verdichters) steigt mit zunehmender Druckdifferenz zwischen Niederdruck und Hochdruck des Kältemittelkreislaufes. Das Druckverhältnis (d.h. der Quotient aus Hochdruck und Niederdruck) hat einen Einfluss auf die Verdichtungsendtemperaturen und damit auf die thermische Belastung des Verdichters.

Abbildung 15: Dampfdruckkurven ausgewählter Kältemittel



Quelle: ETSuS UG basierend auf Refprop 10.0

Im interessanten Temperaturbereich von ca. -50°C bis 100°C bilden die natürlichen Kältemittel R718 (Wasser) und R744 (Kohlendioxid) quasi die Hüllkurven als Niederdruck- bzw. Hochdruckkältemittel. Aus dem Diagramm (Abbildung 15) wird ersichtlich, dass von den natürlichen Reinstoff-Kältemitteln R290 und R717 (Ammoniak) im derzeit technisch gut beherrschbaren Druckbereich der Heizungsanwendung liegen. R600a (Isobutan) ist ein geeignetes Kältemittel für den Einsatz in Brauchwasserwärmepumpen. Die relativ flache Kurve für R290 begünstigt grundsätzlich eine höhere Verdichtereffizienz aufgrund der geringeren Druckdifferenzen und Druckverhältnisse im Vergleich zu R32, R454C oder R410A.

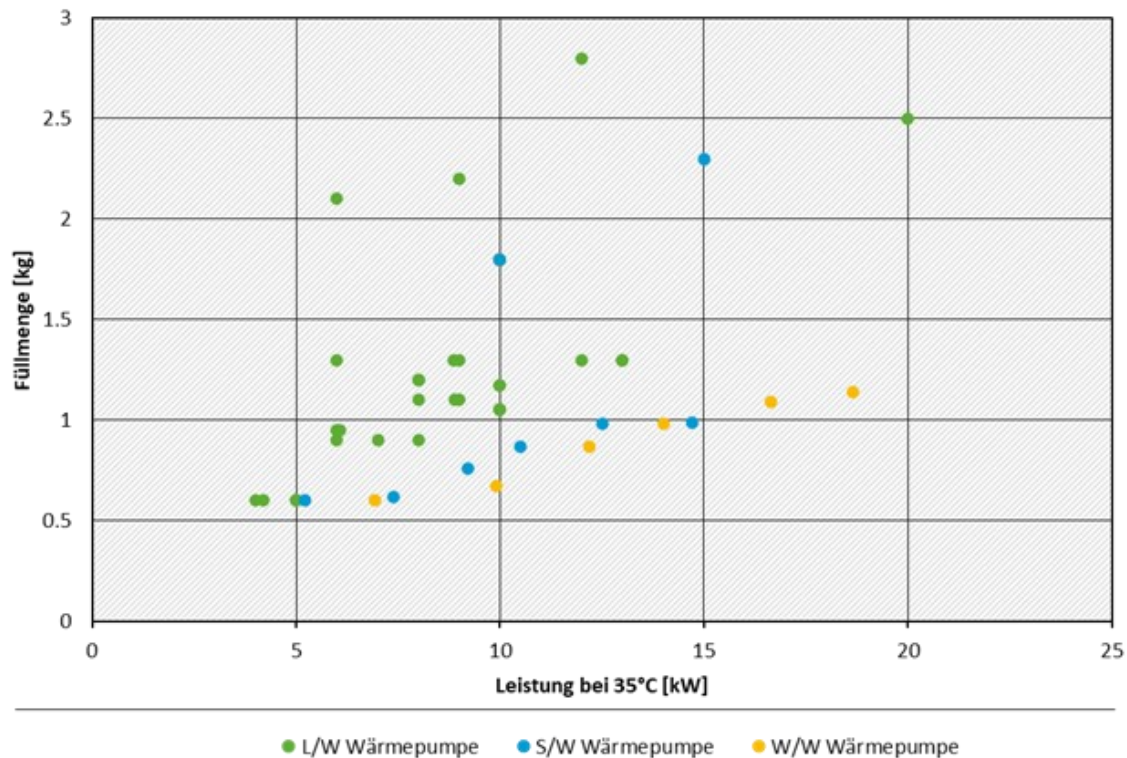
Füllmengen

Die unterschiedliche Füllmenge verschiedener Kältemittel wird bei gleichen Wärmeübertragergrößen / Anlagenkonfigurationen im Wesentlichen durch die Dichten der Flüssigkeit im Verflüssiger vorgegeben. Laut dem UNEP-Bewertungsbericht von 2014 beträgt die Kältemittelfüllung 0,3 kg/kW für R410A und R407C. Für R134a ist sie 33 Prozent höher (0,4 kg/kW) und für Kohlenwasserstoffe und CO₂ (R744) ist sie mit 0,15 kg/kW um 50 Prozent niedriger, was auf Unterschiede bei den thermischen Eigenschaften, der Dichte, dem Kompressor-/Kondensator-/Verdampfertyp, der Gesamteffizienz usw. zurückzuführen ist. Bei R32 ist die Füllung etwa 10 bis 20 Prozent niedriger als für R410A und R407C (Kuijpers & Peixoto, 2014). Daraus lässt sich ableiten, dass die neueren HFKW/HFO-Gemischen keine Vorteile gegenüber den natürlichen Kältemitteln aufweisen (siehe Tabelle 20 „Flüssigkeitsdichte“).

Die Füllmenge variiert jedoch auch mit der Leistung, wie in Abbildung 16 exemplarisch für das Kältemittel Propan gezeigt wird (X-Achse ist die Leistung in Kilowatt bei Nennbedingungen, entnommen aus Herstellerprospekten). Bei kleineren Leistungen ist die Füllmenge relativ höher (0,4 kg/kW bei 5 Kilowatt) und bei höheren Leistungen niedriger (0,13 kg/kW bei ca. 20

Kilowatt). Bei L/W-WP weisen die Modelle, die über eine aktive Kühlfunktion verfügen eine höhere Füllmenge auf, da zum effizienten Kühlbetrieb der Lamellenwärmeübertrager (LWT) als Verflüssiger dann eine größere Menge Kältemittel benötigt als der Plattenwärmeübertrager (PWT) im Wärmepumpenbetrieb.

Abbildung 16: Kältemittelfüllmenge nach Heizleistung für R290-Wärmepumpen, unterschieden nach Wärmepumpentyp



Quelle: eigene Darstellung basierend auf Herstellerangaben

3.2.2 Natürliche Kältemittel

Kohlenwasserstoffe

Aufgrund der thermodynamischen Eigenschaften sind Kohlenwasserstoffe ausgezeichnete Kältemittel. L/W-WP mit Kohlenwasserstoffen als Kältemittel zur Außenaufstellung sind am Markt etabliert (siehe Kapitel 2.2.4). Vorteilhaft ist die gute Löslichkeit von Kohlenwasserstoffen mit dem Öl, die zum guten Abtransport aus dem Verdampfer durch die Viskositätsminderung führt. In der Praxis wirkt sich dies positiv auf die Effizienz der Wärmepumpe aus.

Die notwendige Verringerung der Kältemittelfüllmenge zur besseren Einsetzbarkeit der Kohlenwasserstoffe, aufgrund der Anforderungen der DIN EN 378 bzw. DIN EN 60335-2-40 ist ggf. ungünstig für die Effizienz. Die Reduktion der Füllmenge erreicht man z.B. durch den Einsatz von Microchannel-Verdampfern oder optimierten Plattenwärmeübertragern. Dazu kommt, dass die zukünftig vermehrt genutzten reversiblen Geräte sowohl Kühl- wie auch Heizfunktion haben und tendenziell eine größere Füllmenge benötigen (s.o. zum Thema Füllmengen). Lösungen, die dieser Herausforderung besonders gut begegnen, sollten daher bei entsprechender Kriterienauswahl positiv bewertet werden. Lösungen zur Minimierung der Füllmenge bei gleichzeitiger Erhöhung der Leistung und ausreichender Effizienz sind derzeit noch nicht am

Markt etabliert und befinden sich eher im Entwicklungsstadium (siehe auch nachfolgenden Abschnitt zum Projekt „LC150“).

Am Fraunhofer ISE wird derzeit eine Wärmepumpe mit niedriger Kältemittel-Füllmenge entwickelt. An dem vom BMWi geförderten Forschungsprojekt „LC150“²³ sind zahlreiche Hersteller beteiligt, darunter Vaillant, Kermi, Bosch Thermotechnik, Viessmann, BDR Thermea, Stiebel Eltron und ait-Deutschland. In diesem Zusammenschluss wird die gemeinsame Entwicklung standardisierter Bauteile angestrebt, um durch höhere Produktionsmengen und automatisierte Produktion die Kosten zu senken. 2019 hatte Fraunhofer bereits einen Sole-Wasser-Kühlkreislauf entwickelt, der unter Verwendung von 150 Gramm R290 eine Heizleistung von 8 Kilowatt erreichte, was einer Reduzierung der Kältemittelfüllmenge um 75 Prozent gegenüber marktüblichen Systemen gleichkommt. Indem die einzelnen Komponenten für den Einsatz von R290 angepasst werden, soll die Kältemittelreduzierung auch für andere Heizleistungen und Betriebspunkte erreicht werden (Stausholm, 2020).

R600a ist grundsätzlich gut geeignet für den Einsatz in Brauchwasserpumpen analog zum Ersatz von R134a bei Haushaltskühlschränken (ähnliche Dampfdruckkurve wie R134a; Nachteil der notwendigen größeren Verdichter aufgrund der volumetrischen Kälteleistung im Vergleich zu R134a in diesem Leistungsbereich (<1 Kilowatt) nicht kritisch aus ökonomischer Sicht) (u.a. Lobnig (2012)). Praktische Anwendung von Kohlenwasserstoffen bei Brauchwasserwärmepumpen findet jedoch derzeit ausschließlich R290. Die Gründe hierfür konnten nicht identifiziert werden; es konnten drei Hersteller ermittelt werden, die bereits R290 einsetzen, der überwiegende Teil der Brauchwasserwärmepumpen wird noch mit R134a betrieben.

R1270 ist in der Nutzung vergleichbar mit R290, ist kommerziell jedoch wenig im Einsatz. Der Vorteil gegenüber R290 ist der leichte Geruch (R290 ist geruchlos), was bei Sicherheitskonzepten positiv genutzt werden könnte (Erkennen von Leckagen). Aufgrund der Doppelbindung wird vermutet, dass es ggf. zur Polymerisation kommen könnte; Nachweise für diese Vermutung bei der Verwendung von Propylen als Kältemittel (R1270) konnten im Rahmen der Studie nicht ermittelt werden.

Verschiedene Gemische von Kohlenwasserstoffen wie R441 und R441A (Gemische Propan (R290) und Propen (R1270), bzw. R290, R600a (Isobutan), R600 (Butan) und R170 (Ethan)) werden bisher insgesamt nur selten genutzt. Diese Gemische wurden entwickelt, um bestimmte thermodynamische Eigenschaften zu optimieren (bspw. erhöht sich durch Zugabe von R600a die kritische Temperatur gegenüber R290 bzw. R1270 was vorteilhaft bei Hochtemperatur-Wärmepumpen wäre. Nachteil ist oft der Temperaturgleit (aufwendigere Anlagenauslegung und ggf. Regelungstechnik).

Kohlenstoffdioxid bzw. Kohlendioxid (CO₂)

Von den natürlichen Kältemitteln mit geeigneten thermodynamischen Eigenschaften im Anwendungsbereich der Hauswärmepumpen ist R744 das einzige A1-Kältemittel. Technische Herausforderungen sind die hohen Drücke (Dichtigkeit/Leckage und Sicherheit) und die niedrige kritische Temperatur. Auch überkritische Anlagen sind Stand der Technik in gewerblichen Kälteanlagen, allerdings wird der Anlagenaufwand zum Erreichen guter Effizienz sehr hoch. Beispielfhaft können hier der Einsatz von Expansionsmaschinen und Ejektoren (Strahlpumpen) genannt werden, die zur Rückgewinnung technischer Arbeit genutzt werden oder die Verwendung von Kaskadenanlagen z.B. mit anderen natürlichen Kältemitteln wie etwa Propan in der Hochdruckstufe. Alle diese Maßnahmen erhöhen den Anlagenaufwand hinsichtlich Auslegung, Optimierung und Material- und Komponenteneinsatz und sind in den

23 Projekttitel: „LC150 Development of a Refrigerant-reduced Heat Pump Module with Propane“

meisten Fällen bei Geräten kleinerer Leistung wie z. B. der Hauswärmepumpen wirtschaftlich nicht wettbewerbsfähig.

Grundsätzlich sind hohe Vorlauftemperaturen realisierbar und damit ist eine gute Eignung für die Warmwasserbereitung gegeben. Der hohe Temperaturleit im überkritischen Betrieb bedingt allerdings große Temperaturdifferenzen im Vor- und Rücklauf was den Einsatz in Raumheizungssystemen nur schwer möglich macht.

Für Anwendungsfälle mit vergleichsweise hohem Warmwasserbedarf bei niedrigem Heizungsbedarf (z.B. Passiv- oder Niedrigenergiehaus) kann eine kombinierte Heizungs- und Warmwasserwärmepumpe mit R744 unter bestimmten Umständen energieeffizient betrieben werden (Müller, Röhlig, & Paatzsch, 2016). Für diesen Anwendungsfall nimmt der Energiebedarf für die Warmwasserzeugung im Vergleich zum Heizenergiebedarf zu und ist ggf. sogar deutlich höher. Im überkritischen Betrieb von CO₂-Wärmepumpen (dies ist für die Heiz- und Warmwasserbereitung der Fall) kann der Temperaturleit im Gaskühler genutzt werden, um die Temperaturerhöhung des Frischwassers von 12 bis 15°C auf über 55°C bei geringer mittlerer Temperaturdifferenz im Wärmeübertrager zu realisieren, wodurch die Effizienz erhöht wird. Wesentliche Anwendungsbereiche für R744 in Wärmepumpen bestehen in großen Leistungsbereichen (ab 50 Kilowatt) zur kommerziellen und industriellen Wärmeversorgung. Die großen Leistungsbereiche machen den Einsatz von R744 insbesondere in W/W-WP attraktiv. Ein weiterer Anwendungsfall ist die L/W-WP ECO-cute des japanischen Wärmepumpenhersteller ITOMIC zur Warmwasserbereitstellung für bis zu 350 Einpersonenhaushalte.

Ammoniak (NH₃)

Ammoniak (R717) ist seit über 150 Jahren als Kältemittel in industriellen Anwendungen großer Leistungsbereiche im Einsatz. Die thermodynamischen Eigenschaften ermöglichen eine hohe Effizienz. Ammoniak ist als Kältemittel der Klasse B2L eingestuft, d. h. es ist gering entflammbar und verfügt über eine erhöhte chronische Toxizität.

Neuere Entwicklungen mit geringeren Füllmengen ermöglichen „kleinere“ Leistungen (Lamb, 2018) im Bereich von minimal 50 bis 100 Kilowatt, d.h. sie sind für Hauswärmepumpen noch nicht geeignet. Wie bei den Kohlenwasserstoffen beschränken die bestehenden Regularien weitere Einsatzbereiche für die Innenaufstellung.

In einer Abschätzung zur Machbarkeit von NH₃-Wärmepumpen im Rahmen einer UBA Studie (Müller et al., 2016) wurde für eine 10 Kilowatt L/W-WP eine notwendige Füllmenge von ca. 1 Kilogramm Ammoniak ermittelt. Damit wäre nur eine Aufstellung im Freien möglich. Eine Innenaufstellung mit ca. 1 Kilogramm ohne separaten Maschinenraum würde nach DIN EN 378 aufgrund des praktischen Grenzwertes ein Raumvolumen von ca. 2857 m³ erfordern.

Weitere natürliche Kältemittel

Wasser (R718): Wasser ist aus Umweltsicht das ideale Kältemittel. Darüber hinaus ist es nicht giftig oder brennbar und fast überall verfügbar. Es hat eine große spezifische Wärmekapazität und eine hohe Wärmeleitfähigkeit und weist die höchste spezifische Verdampfungsenthalpie auf. Nachteilig ist die geringe volumetrische Kälteleistung. Die Dampfdruckkurve und der hohe Normalsiedepunkt schränken die Anwendungsmöglichkeiten ein. Für den Einsatz in Wärmepumpen ist die Anwendung in Hochtemperaturwärmepumpen nachgewiesen (Hanslik & Süß, 2019). Die Verwendung in Hauswärmepumpen ist nur schwer zu realisieren. Anwendungen unter 0°C können zu Schäden führen (Aufrieren) und das notwendige Vakuum für niedrige Verdampfungstemperaturen auch oberhalb 0°C sind technisch anspruchsvoll. Der Einsatz in L/W-

und S/W-WP ist damit nicht möglich. Denkbar wäre die Verwendung in Kalt-Wärmenetzen z. B. in Quartierlösungen als Temperaturbooster.

Distickstoffmonoxid (Lachgas) (R744A): R744A ist ein Kältemittel, das für

Tieftemperaturanwendungen unterhalb von -50°C eingesetzt werden kann. Der GWP liegt mit 265 für ein natürliches Kältemittel recht hoch und ein Ozonabbaupotenzial (Ozone Depletion Potential, ODP) von 0,017 ist kritisch zu bewerten (auch wenn die Verwendung in Produkten bisher nicht reglementiert ist). Die starke Oxidationsneigung und die Möglichkeit der Hydratbildung sind weitere kritische Faktoren beim Einsatz in Kälteanlagen (Germanus, Feja, Junk, & Hanzelmann, 2018). Eine Eignung für Hauswärmepumpen ist nicht gegeben.

Luft wurde wie die meisten natürlichen Kältemittel bereits im 19. Jahrhundert eingesetzt. Die Vorteile von Luft hinsichtlich der Umwelteigenschaften sind mit denen des Wassers vergleichbar, nur dass die Anwendungstemperaturen am untersten Ende des technischen Nutzbereiches liegen. Praktische Verfahren zur Kälteerzeugung im Temperaturbereich oberhalb der Gasverflüssigungstechnik werden daher als Kaltgasprozess ausgeführt, d.h. es findet kein Phasenwechsel statt. Realisierte Anlagen finden sich z. B. in der Klimatisierung von Flugzeugen oder Zügen (ICE 3) eingesetzt (Ebinger 2013). Neuere Anwendungen finden sich z. B. in der Medizintechnik zur Kühlung von Rheumakammern (Stausholm, 2019). Auf eine mögliche Anwendung für Wärmepumpen konnten im Rahmen der Recherche keine Hinweise identifiziert werden.

Tabelle 20: Physikalische Kennwerte von Kältemitteln

Kältemittel	Bezeichnung / Zusammensetzung (Massen %)	GWP (AR4 ²⁴)	Sicherheits- gruppe	NBP ²⁵ [°C]	Gleit ²⁶ [K]	Kritische Temperatur. [°C]	Kritischer Druck [bar]	Verdampf- ungs- Enthalpie [kJ/kg] ²⁷	Volumetri- sche Kälte- leistung [kJ/m ³] ²⁸	Flüssigkeits- Dichte ²⁹ [kg/m ³]
R290	Propan (C ₃ H ₈)	3	A3	-42	0	97	42	425	1030	467
R1270	Propen (C ₃ H ₆)	2	A3	-48	0	91	46	439	1020	479
R600a	Isobutan (C ₄ H ₁₀)	3	A3	-12	0	135	36	365	1022	531
R717	Ammoniak (NH ₃)	0	B2L	-33	0	132	113	1369	1236	580
R744	Kohlenstoffdioxid (CO ₂)	1	A1	-57	0	31	74	323	8445	NA
R718	Wasser	0	A1	100	0	374	221	2256	NA	1000
R436A	R290/600a (56,0/44,0)	3	A3	-33	8	116	43	368	kA	kA

24 AR4: gemäß IPPC 4th Assessment Report, Zeithorizont 100 Jahre

25 NBP: Normal Boiling Point: Siedetemperatur bei 1,013 bar bzw. Sublimationstemperatur für R744

26 Gesamt-Gleit von Siede- bis Taulinie bezogen auf 1,013 bar (absolut). Realer Temperaturgleit ist abhängig von Betriebsbedingungen.

27 Bei 1,013 bar, für R744 bei -40°C

28 Bei 1,013 bar mit Taudichte (entspricht 0 K Überhitzung), für R744 bei -40°C Verdampfungstemperatur

29 Flüssigkeitsdichte bei 40°C auf der Siedelinie

Kältemittel	Bezeichnung / Zusam- mensetzung (Massen %)	GWP (AR4 ²⁴)	Sicherheits- gruppe	NBP ²⁵ [°C]	Gleit ²⁶ [K]	Kritische Temperatur. [°C]	Kritischer Druck [bar]	Verdampf- ungs- Enthalpie [kJ/kg] ²⁷	Volumetri- sche Kälte- leistung [kJ/m ³] ²⁸	Flüssigkeits- Dichte ²⁹ [kg/m ³]
R441A	R170/290/600a/6 00 (3,1/54,8/6,0/36, 1)	3,5	A3	-42	22	119	45	382	kA	kA
R443A	R1270/290/600a (55/40/5)	2,5	A3	-44	4	96	45	276	kA	kA
R32	Difluormethan CH ₂ F ₂	675	A2L	-52	0	78	58	1262	1120	893
R410A	R32/125 (50/50)	2088	A1	-51	0,5	71	49	221	1107	909
R134a	Tetrafluorethan (CH ₂ F-CF ₃)	1430	A1	-26	0	101	41	216	1143	1147
R407C	R32/125/134a (23/25/52)	1774	A1	-44	7	86	46	249	1153	1067
R454B	R32/1234yf (31,1/68,9)	466	A2L	-51		1,5	52,7	312	1122	909
R454C	R32/1234yf (21,5/78,5)	148	A2L	-46	8	82	43	224	1103	970

3.2.3 Öl

Verdichter benötigen für den sicheren Betrieb Öl zur Schmierung der bewegten Bauteile (Ausnahme ölfreie Verdichter weit oberhalb des Leistungsbereiches der Hauswärmepumpen). Das Öl gelangt mit dem transportierten Kältemittel in den Kältemittelkreislauf außerhalb des Verdichters. In den Wärmeübertragern kann das Öl an den Wärmeübertragungsflächen den Wärmeübergang verschlechtern und damit die Effizienz der Wärmepumpe negativ beeinflussen. Besonders im Verdampfer kann es bei niedrigen Temperaturen aufgrund der höheren Viskosität des Öles zur Ansammlung von Öl kommen. Wichtig ist daher die Rückführung des Öles zum Verdichter. Zum einen muss immer genügend Öl im Verdichter vorhanden sein, um die notwendige Schmierung zu gewährleisten. Zum anderen sollte das Öl möglichst nicht in Wärmeübertragern den Wärmeübergang verschlechtern.

Vorteilhaft bei Einsatz von Kohlenwasserstoffen ist die gute Löslichkeit mit dem Öl, die zum guten Abtransport aus dem Verdampfer durch die Viskositätsminderung führt. In der Praxis wirkt sich dies positiv auf die Effizienz der Wärmepumpe aus.

3.2.4 Sonstige Materialbetrachtung

Die Anforderungen an die in Hauswärmepumpen verwendeten Materialien werden stark durch technische Anforderungen geprägt. Dies sind zum einen die Materialverträglichkeit gegenüber dem verwendeten Kältemittel und dem eingesetzten Öl sowie die Anforderungen an die Festigkeiten, Stabilität und Dichtheit.

Der Verflüssigungsdruck von Propan bei 65°C liegt bei ca. 23 bar, die meisten Standardkomponenten sind für 45 bar ausgelegt. Bei der Verwendung von R744 im überkritischen Bereich liegen die Drücke bei über 100 bar. In Kombination mit geeigneten Verbindungstechniken ergibt sich daraus der Einsatz von Kupfer, Aluminium sowie Stahl für die Hauptkomponenten und Leitungen. Alternative Materialien bspw. aus nachwachsenden Rohstoffen, die den Anforderungen an Festigkeit, Dichtheit und Beständigkeit gegen Öl und Kältemittel entsprechen, konnten nicht identifiziert werden. Da die Druck- und Temperaturlagen der natürlichen Kältemittel (mit Ausnahme von R744) in ähnlichen Größenordnungen wie die der fluorierten Kältemittel liegen, ergibt sich somit kein Nachteil bei Einsatz der natürlichen Kältemittel.

Die Größen der einzelnen Komponenten und damit auch die eingesetzte Materialmenge ergibt sich primär aus der notwendigen Heizleistung und aus dem Wärmepumpentyp. Diese physikalischen Notwendigkeiten lassen sich nur bedingt beeinflussen. In bestimmten Fällen können auch akustische Anforderungen die Materialauswahl bzw. die Menge (notwendige Massen zu Dämpfung etc.) beeinflussen. Die Verbesserung der Effizienz z. B. durch Vergrößerung der Wärmeübertragungsflächen erhöht ggf. den Materialeinsatz.

Kunststoffe werden in Hauswärmepumpen zur thermischen Isolation, zur Schallisolation, als Verpackungsmaterial, zur Montage von Bauteilen und auch als Designelement eingesetzt. Je nach Einsatzbereich bestimmen die spezifischen Eigenschaften des Kunststoffes den Einsatz. Dazu gehören die thermischen Isolierungen (geringe Wärmeleitfähigkeit) und auch die Formbarkeit beispielsweise bei Gehäuseteilen. Der Ansatz eines ökologischen Produktdesigns bei den Kunststoffen lässt sich technisch im Bereich der Verpackung realisieren. Neben dem kompletten Vermeiden (z. B. Verzicht auf Folienverpackung) können Materialien wie Polystyrol auch durch Kartonagen ersetzt werden. Aus der Befragung der Hersteller ergaben sich jedoch Kostennachteile beim Einsatz der Kartonagen. Hier könnte das Kriterium „Einsatz nachhaltiger Materialien“ ggf. einen Anreiz zum vermehrten Einsatz dieser Materialien geben.

Eine ganzheitliche Betrachtung sollte auch die Recyclingfähigkeit der Komponenten und Materialien enthalten.

3.3 Effizienz von Hauswärmepumpen

3.3.1 Grundlagen und Einflussfaktoren

Die Effizienz ist nach allgemeinem (technischen) Verständnis definiert als Quotient aus Nutzen zu Aufwand. Für die Wärmepumpenanwendung entspricht das dem Verhältnis aus Heiznutzen (ggf. unter Berücksichtigung der Warmwasserbereitung) und der aufgewendeten Antriebsenergie zum Erreichen des Nutzens.

Die theoretische maximale Effizienz in einem bestimmten Betriebspunkt der Wärmepumpe ist die Leistungszahl COP_H definiert als $COP_H = T_C / (T_C - T_0)$; der Index H kennzeichnet die Anwendung auf der warmen Seite der Anlage (Heizen). Die Effizienz in diesem Betriebspunkt ist somit zunächst nicht vom eingesetzten Kältemittel abhängig.

Im praktischen Betrieb ergeben sich Unterschiede bei Verwendung unterschiedlicher Kältemittel, zunächst durch die Dampfdruckkurven und die dadurch realisierten Drücke bei den Anwendungs- / Wärmequellentemperaturen. (siehe Abschnitt 3.2.1). Die Druckdifferenzen und Druckverhältnisse haben Einfluss auf die Effizienz und die notwendige Antriebsleistung des Verdichters.

In der praktischen Anwendung wird die Leistungszahl zu $COP_H = Q_C / P_{el}$, mit Q_C als Verflüssigerleistung (maximale Nutzenergie) und P_{el} der elektrischen Antriebsenergie. Da die Verflüssigerleistung im theoretischen Maximum der Summe aus aufgenommener Verdampferleistung und elektrischer Antriebsenergie entspricht, haben neben der Verdichter-Effizienz auch die Wärmeübertrager maßgeblichen Einfluss auf die praktische Effizienz (siehe Kapitel 3.3.5).

Einfluss der System- / Anwendungstemperaturen und WP-Bauformen auf die Effizienz

Wie im obigen Absatz dargestellt, haben die Systemtemperaturen, die immer von den Anwendungsbedingungen auf der Wärmequellen- und Wärmesenkenseite bestimmt werden, maßgeblichen Einfluss auf die Effizienz der Wärmepumpe im Betrieb. Niedrige Wärmesenkentemperaturen und höhere Wärmequellentemperaturen führen zu höheren COPs.

Beim Heizbetrieb ergeben sich aus dem Wärmeverteilsystem unterschiedlich hohe Vorlauftemperaturen, als Richtwert können 35°C für die Fußbodenheizung (Neubau) und mindestens 55 °C bei Radiatorenbetrieb (Sanierung im Bestandsgebäude) angesetzt werden. Als Richtwert für die Warmwasserbereitung kann ebenfalls 55°C angesetzt werden. Die Effizienz bei Niedertemperatursystemen ist daher höher als bei Radiatorenbetrieb bzw. bei der Warmwasserbereitung.

Die durchschnittliche Wärmequellentemperatur ist bei W/W-WP am höchsten (die Normnennbedingung entsprechend der EN14511 liegt bei 10°C Wärmequellen-Eintrittstemperatur, bzw. 7°C Wärmequellen-Austrittstemperatur); bei S/W-WP liegt die Temperatur niedriger (die Normnennbedingung entsprechend der EN14511 liegt bei 0°C Wärmequellen-Eintrittstemperatur, bzw. -3°C Wärmequellen-Austrittstemperatur). Die Schwankungsbreite der Temperaturen ist für W/W-WP am geringsten (nahezu konstant), bei S/W-WP ist die Schwankung bei Flächenkollektoren höher als bei Erdsonden da die Bodentemperatur in der geringeren Tiefe stärker variiert. Die Wärmequellentemperatur von L/W-WP ist im Jahresmittel am geringsten und schwankt auch am stärksten: von Normaußentemperaturen -10 bis -16 °C bis zur Heizgrenztemperatur von 12 bis 15 °C. Bei

gleichen Anwendungstemperaturen weisen W/W-WP die höchste Effizienz auf, die L/W-WP die geringste und die S/W-WP liegen dazwischen.

Die Zusammenhänge zwischen Komponenten, Konfiguration, Kältemittel und Regelung sind komplex und nicht rückwirkungsfrei. Praktische Untersuchungen sind daher zur Bestimmung der tatsächlichen Anlageneffizienz immer notwendig und Optimierungsaufgaben sehr aufwendig.

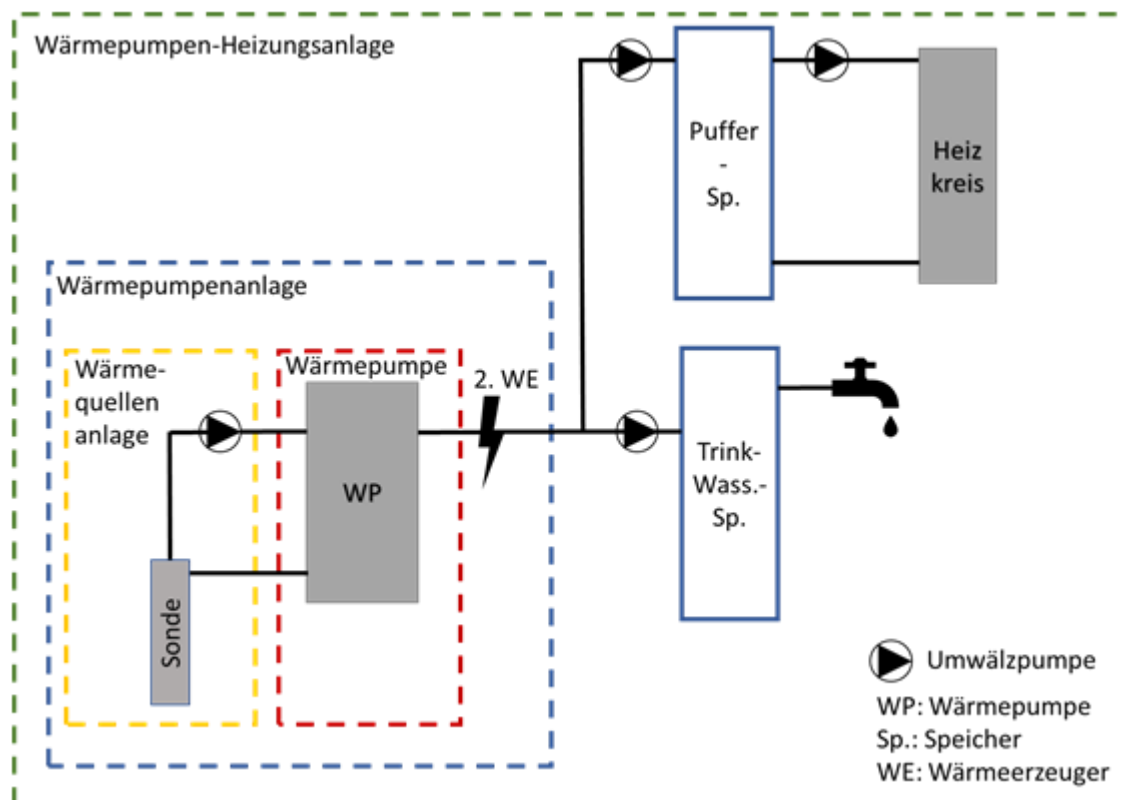
Da die Bilanzierung der Effizienz (und damit das Ergebnis der Effizienzbestimmung) von der Wahl der Bilanzgrenzen abhängig ist, ist neben der reinen Wärmepumpe als Gerät ggf. auch die Wärmequellenanlage und das Heizverteilsystem (Wärmesenke) in die Bilanzierung mit einzubeziehen.

Systeme und Bilanzgrenzen

Die Bestimmung der Effizienz erfordert eine Bilanzierung und somit auch eine Festlegung von Bilanzgrenzen. Bei einem Vergleich von Effizienzwerten ist daher immer zu prüfen, welches System mit welchen Bilanzgrenzen betrachtet wurde.

In der folgenden Abbildung sind die Bilanzgrenzen in Anlehnung an die VDI 4650 schematisch dargestellt. Gemäß dieser Norm wird die Jahresarbeitszahl (JAZ) für die Wärmepumpe ohne Berücksichtigung des zweiten Wärmerzeugers ermittelt und weitere Verbraucher wie etwa die Umwälzpumpen befinden sich nicht innerhalb der Bilanzgrenze „Wärmepumpe“. Die Einflüsse durch weitere Energieverbraucher wie Pumpen und zweiten Wärmeerzeuger wird in der Wärmepumpenanlage abgebildet. Dieses Vorgehen findet sich analog auch in den Berechnungsalgorithmen zum SCOP zur Ökodesign-Richtlinie.

Abbildung 17: Bilanzgrenzen nach VDI 4650



Quelle: ETSuS UG, Kulmbach

Für die Abschätzung und Bewertung weiterer Potenziale beim Einsatz der Hauswärmepumpe sind die Einflüsse etwa der Wärmquellensysteme zur Nutzung weiterer regenerativer Anteile separat zu berücksichtigen. Dies ist z. B. aus Anwendungssicht im Gebäudeenergiegesetz (GEG) realisiert (u.a. Abwärmenutzung, Fernwärme und Fernkälte, Solarthermie, etc. und auch deren Kombination).

3.3.2 Kennzahlen zur Bewertung der Effizienz

Zur Bewertung der Effizienz von Wärmepumpen werden verschiedene Kennzahlen verwendet, wobei alle eine „Nutzen zu Aufwand“-Betrachtung anwenden. Wie die Leistungskennzahlen sind Arbeitszahlen dimensionslose Kennzahlen. Rein physikalisch ist eine Leistungszahl das Verhältnis zweier Leistungen (Output/Input), gemessen in [kW/kW]. Bei Arbeitszahlen wird die Nutzarbeit in [kJ bzw. kWh] ins Verhältnis zur Antriebsarbeit [kJ, bzw. kWh] gesetzt. Damit wird ein Gerät (z.B. Wärmepumpe) über einen definierten Nutzzeitraum bewertet.

1. Der **COP** (Coefficient of Performance oder „Leistungszahl im Heizbetrieb“ nach DIN EN 14511) beschreibt das Verhältnis der Nutzleistung zur elektrischen Antriebsenergie. Dabei werden die Leistungen in einem definierten Betriebspunkt ins Verhältnis gesetzt. Notwendig ist daher immer die Angabe der Referenzbedingungen („standard rating conditions“). Die Ermittlung der COPs erfolgt üblicherweise durch Messung unter definierten und reproduzierbaren Laborbedingungen im stationären Betrieb. Somit ist ein Vergleich verschiedener Wärmepumpen (ausschließlich für die repräsentativen Betriebspunkte) und die Überprüfung der Herstellerangaben durch unabhängige Institutionen und die Marktaufsicht möglich.
2. Der **COP_{DHW}** ist die Leistungszahl für Brauchwasser, die nach DIN EN 16147 ermittelt wird. Je nach Anwendung werden weitere Kennwerte ermittelt, die sich auf typische Referenz (Einsatz)-bedingungen der jeweiligen Anwendungen beziehen. Dies ist z.B. EER (Energy Efficiency Ratio, sprich die „Kälteleistungszahl“ oder „Leistungszahl im Kühlbetrieb“ nach DIN EN 14511).

Abkürzungen für Testtemperaturen

W: Wasserkreislauf am Innenwärmeübertrager
 A: Außenluft (Außenwärmeübertrager)
 B: Sole (aus dem Englischen: brine)

Beispiel: Die Leistungs- und Energieeffizienzkennwerte für eine L/W-WP im niedrigen Temperaturniveau werden entsprechend mit „A7/W35“ gekennzeichnet (Norm-Nennbedingungen). Die Außenluft beträgt 7°C, die Vorlauftemperatur beträgt 35°C.

Für die Erfüllung der ErP-Richtlinie werden die SCOP-Werte berechnet (nach DIN EN 14825). Basis sind Labormessungen (nach DIN EN 14511 für die Raumheizung bzw. DIN EN 16147 für Warmwasserwärmepumpen) der Leistungszahlen in definierten Betriebspunkten, die gewichtet nach Häufigkeit der Temperaturstunden je Betriebspunkt umgerechnet werden.

Bei der Jahresarbeitszahl (JAZ) bzw. dem **SCOP** (Seasonal Coefficient Of Performance oder „saisonale Arbeitszahl im Heizbetrieb“ nach DIN EN 14825, bzw. „jahreszeitbedingte Leistungszahl“ nach der Ökodesign-Verordnung (EU) Nr. 813/2013(EU, 2013c)) ist der betrachtete Zeitraum (Bezugszeitraum) die Heizperiode. Dies entspricht prinzipiell einem Jahr, zur Berechnung werden allerdings die Heizstunden verwendet. Diese integrale Betrachtung ermöglicht einen praxisnäheren Vergleich der Wärmepumpen.

Der Wert η_s (η_{s}) ist die „jahreszeitbedingte Raumheizungs-Energieeffizienz“³⁰. Der Wert wird berechnet aus dem Quotienten aus dem von einem Heizgerät gedeckten Raumheizwärmebedarf für eine bestimmte Heizperiode und dem zur Deckung dieses Bedarfs erforderlichen jährlichen Primärenergieverbrauch in Prozent. Der Wert wird berichtigt um die Beiträge zur Berücksichtigung der Temperaturregler sowie, bei Raumheizgeräten oder Kombiheizgeräten mit W/W-WP- oder S/W-WP, des Stromverbrauchs der Grundwasserpumpe(n).

3.3.3 Überblick der Effizienzen der Wärmepumpen am Markt

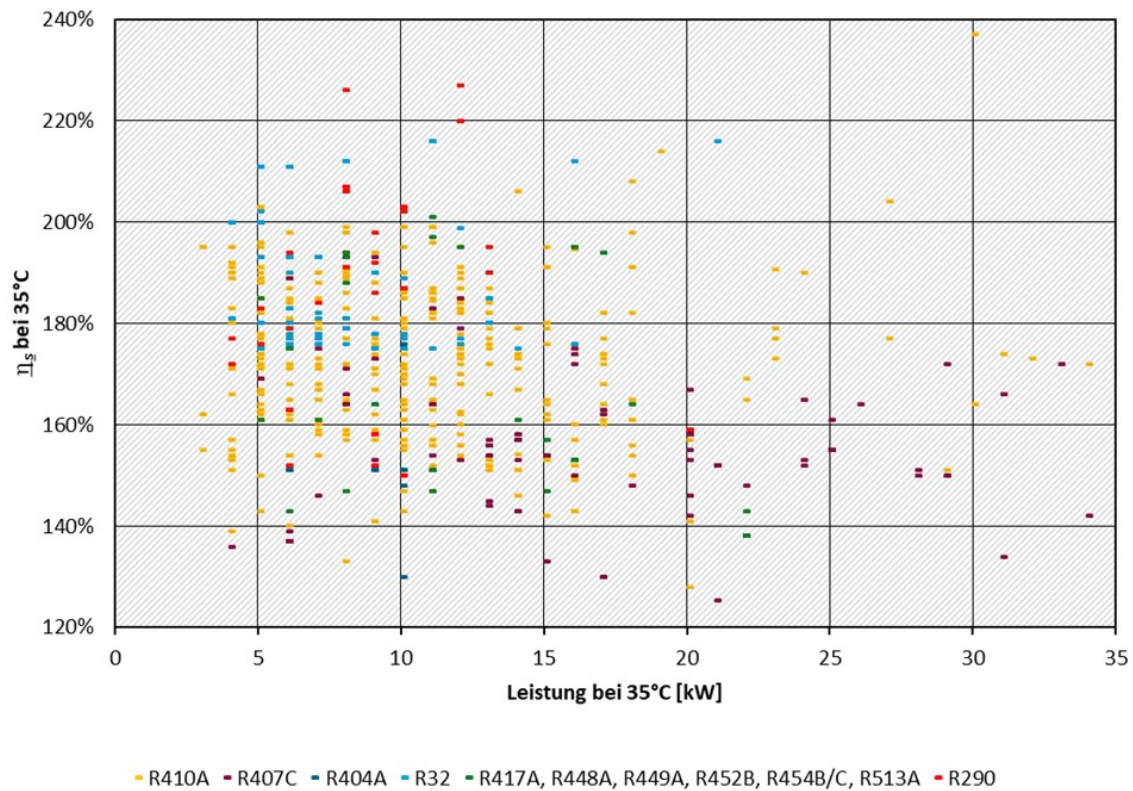
Für die Datenanalyse wurde die österreichische Datenbank get ausgewertet (Salzburger Landesregierung (2021)). Diese Datenbank enthält alle am österreichischen Markt erhältlichen Wärmepumpen. Es wurde angenommen, dass es keine gravierenden Unterschiede zwischen dem Deutschen und dem österreichischen Markt gibt. Um den Markt für R290 Wärmepumpen noch genauer abzubilden, wurden zusätzlich Wärmepumpenmodelle der Firma Hautech den Daten hinzugefügt.

3.3.3.1 L/W-WP

Abbildung 18 zeigt η_s aller Modelle bis zu einer Leistung von 35 Kilowatt (gerundet) bei 35°C Vorlauftemperatur. Eine Korrelation mit der Leistung ist bis 19 Kilowatt nicht zu sehen. Wärmepumpen mit Leistungen über 20 Kilowatt haben geringere Effizienzen. WP mit den Kältemitteln R290 und R32 haben bis 15 Kilowatt Leistung die höchsten Effizienzen. Bei höheren Leistungsklassen sind dies R32 und R410A, welches den höchsten Anteil an allen L/W-WP hat (siehe auch Kapitel 2.2.3). In diesem Leistungsbereich sind momentan keine Wärmepumpen mit R290-Kältemittel am Markt verfügbar.

³⁰ Die Verordnungen für Raumheizgeräte und Warmwassererzeuger zur Durchführung der Ökodesign-Richtlinie haben das Ziel, Anforderungen für das Inverkehrbringen von Produkten in der EU festzulegen. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, verschiedene Technologien für die betrachteten Anwendungsfälle hinsichtlich ihrer Energieeffizienz zu bewerten und auch mit anderen Heiztechniken vergleichbar zu machen. Aus diesem Grund werden die Arbeitszahlen primärenergetisch bewertet. Im konkreten Fall wird der SCOP mit dem Umwandlungsfaktor CC (Conversion Coefficient, entspricht dem Primärenergiefaktor) ins Verhältnis gesetzt. In den Ökodesign-Verordnungen und Energieverbrauchskennzeichnung-Verordnungen ist der Wert für CC auf 2,5 fixiert (EU, 2013c, 2013d, 2013a, 2013b). Die Basis für diesen Wert bildet die Richtlinie 2012/27/EU.

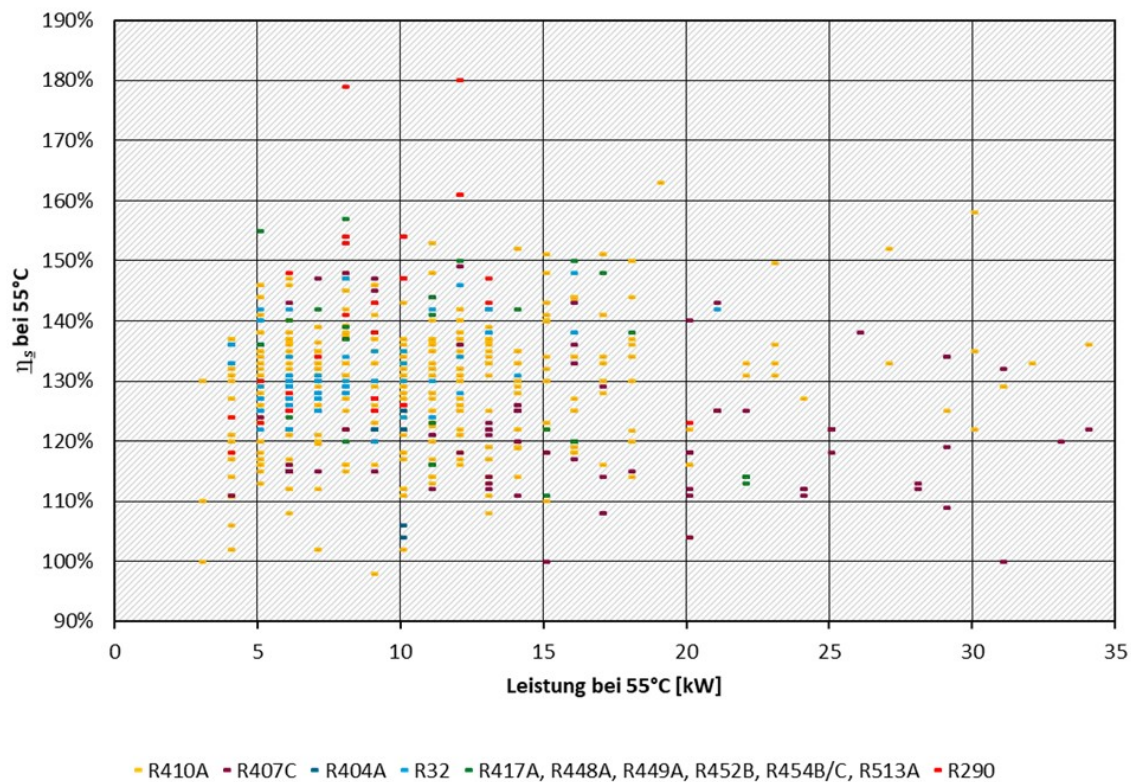
Abbildung 18: Energieeffizienz von L/W-WP mit verschiedenen Kältemitteln nach Leistung (Designtemperatur 35°C)



Quelle: Salzburger Landesregierung (2021) und Hauteq Datenblätter

Abbildung 19 zeigt die Daten der gleichen Modelle für eine Vorlauftemperatur von 55°C. Auch hier ist keine Korrelation mit der Leistung bis circa 20 Kilowatt zu sehen. WP mit dem Kältemittel R290 sind hier die effizientesten bis zu einer Leistung von 15 Kilowatt.

Abbildung 19: Energieeffizienz von L/W-WP mit verschiedenen Kältemitteln nach Leistung (Designtemperatur 55°C)

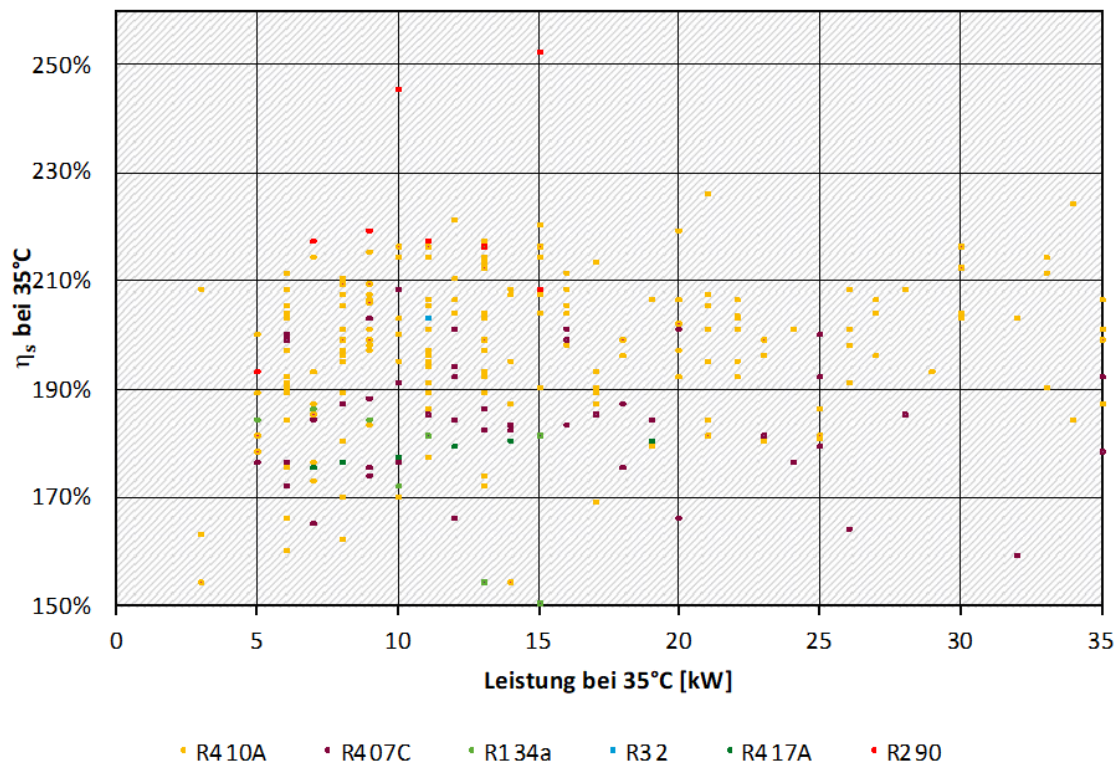


Quelle: Salzburger Landesregierung (2021) und Hauteq Datenblätter

3.3.3.2 S/W-WP

Abbildung 20 zeigt η_s aller Modelle bis zu einer Leistung von 35 Kilowatt (gerundet) bei 35°C Vorlauftemperatur. Eine Korrelation mit der Leistung ist bis 15 Kilowatt nicht zu sehen. Wärmepumpen mit Leistungen über 15 Kilowatt erreichen weniger häufig hohe Effizienzen als in niedrigeren Leistungsklassen. WP mit den Kältemitteln R290 haben bis 15 Kilowatt Leistung die höchsten Effizienzen. Es gibt in allen Leistungsklassen viele effiziente WP mit dem Kältemittel R410A. Über 15 Kilowatt Leistung sind momentan keine Wärmepumpen mit R290 Kältemittel am Markt verfügbar.

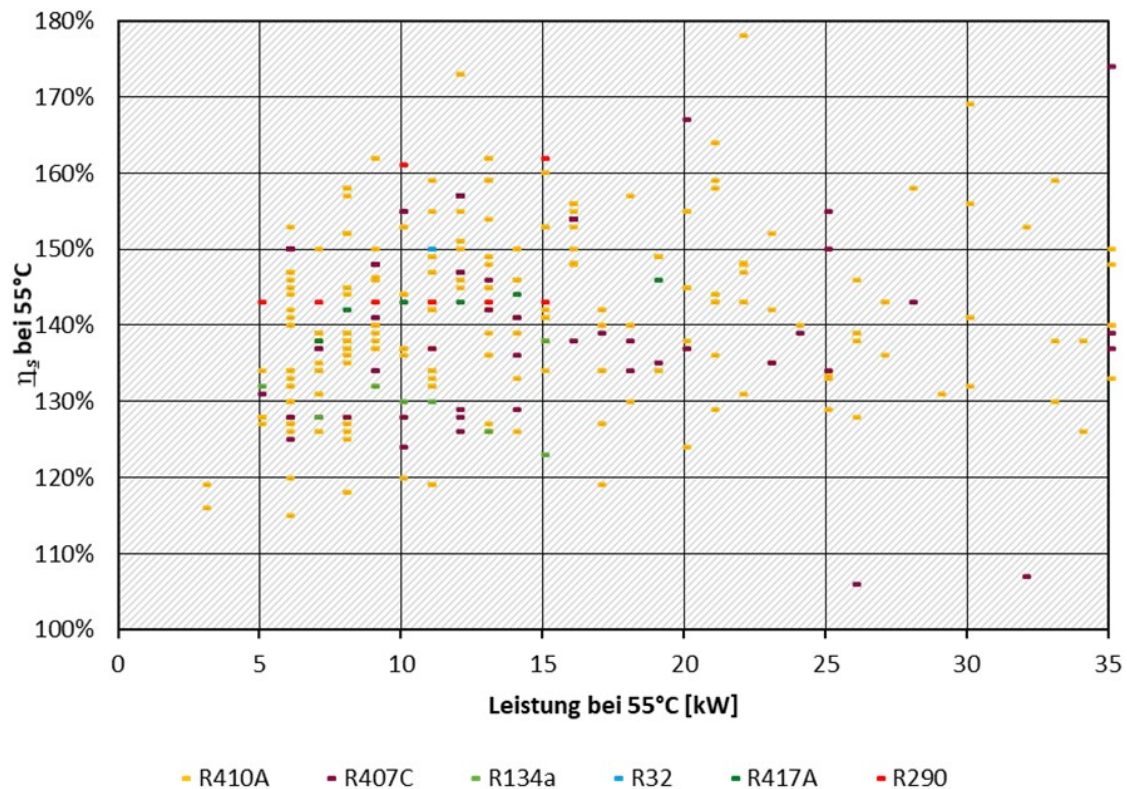
Abbildung 20: Energieeffizienz von S/W-WP mit verschiedenen Kältemitteln nach Leistung (Designtemperatur 35°C)



Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf Daten der Salzburger Landesregierung (2021) und Hauteq Datenblätter

Abbildung 21 zeigt die Daten der gleichen Modelle für eine Vorlauftemperatur von 55°C. Eine Korrelation mit der Leistung ist hier nicht zu sehen. Zwei WP mit dem Kältemittel R290 haben auch hier hohe Effizienzen. Ansonsten sind die Modelle eher im Mittelfeld zu finden. Die effizientesten Modelle enthalten R410A oder R407C.

Abbildung 21: Energieeffizienz von S/W-WP mit verschiedenen Kältemitteln nach Leistung (Designtemperatur 55°C)

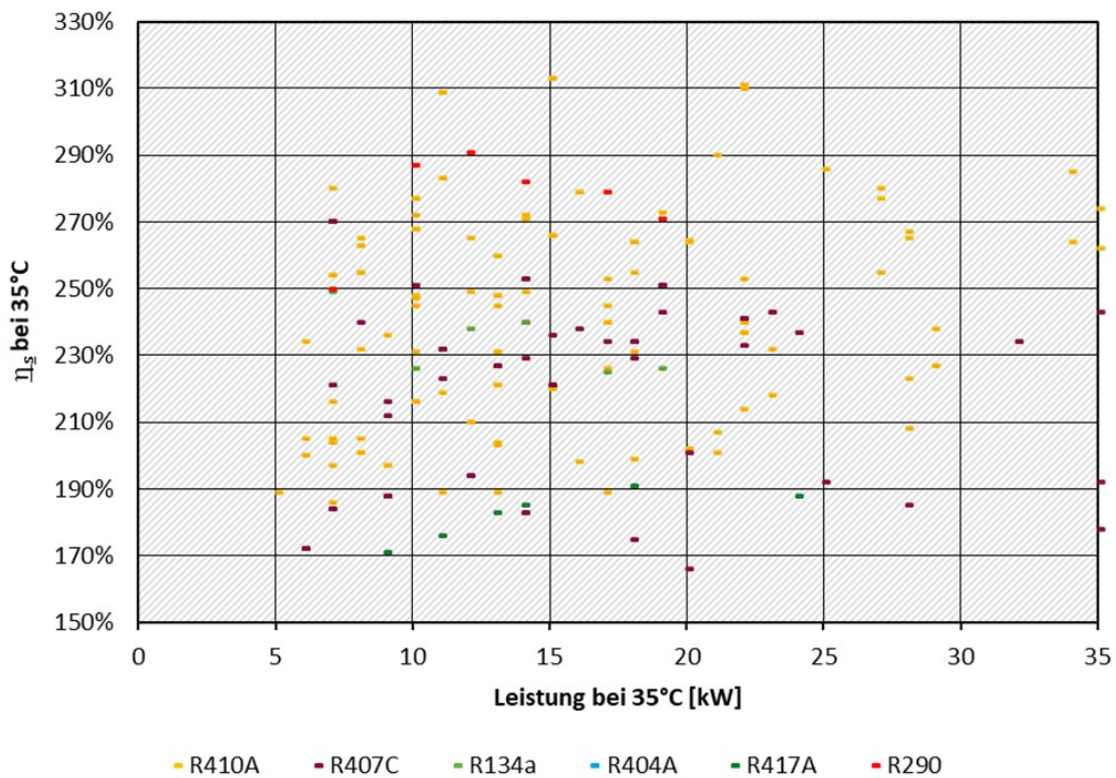


Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf Daten der Salzburger Landesregierung (2021) und Hauteq Datenblätter

3.3.3.3 W/W-WP

Abbildung 22 zeigt η_s aller Modelle bis zu einer Leistung von 35 Kilowatt (gerundet) bei 35°C Vorlauftemperatur. Eine Korrelation mit der Leistung ist nicht zu sehen. WP mit dem Kältemittel R290 haben bis 20 Kilowatt Leistung sehr hohe Effizienzen. WP mit R410A haben die höchsten Effizienzen. Über 20 Kilowatt Leistung sind momentan keine Wärmepumpen mit R290 Kältemittel am Markt verfügbar.

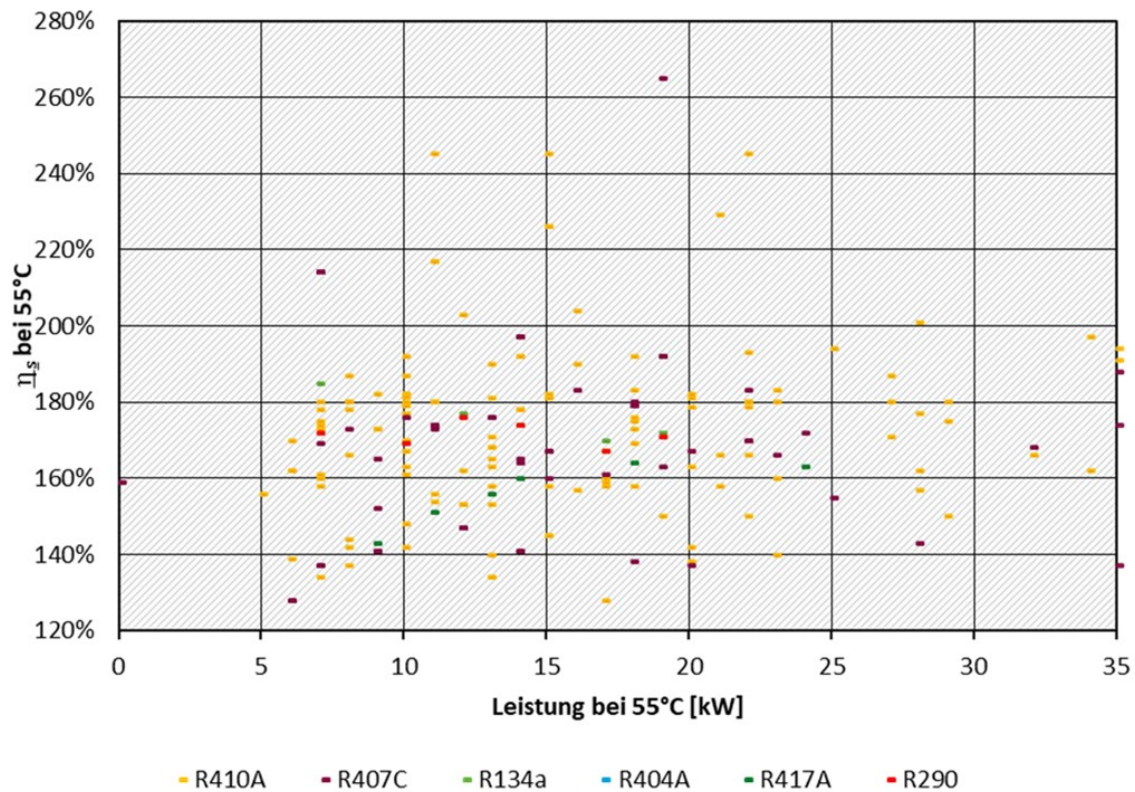
Abbildung 22: Energieeffizienz von W/W-WP mit verschiedenen Kältemitteln nach Leistung (Designtemperatur 35°C)



Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf Daten der Salzburger Landesregierung (2021) und Hauteq Datenblätter

Abbildung 23 zeigt die Daten der gleichen Modelle für eine Vorlauftemperatur von 55°C. Eine Korrelation mit der Leistung ist hier nicht zu sehen. Die effizientesten Modelle enthalten R410A oder R407C. WP mit R290 erreichen hier nur Durchschnittswerte.

Abbildung 23: Energieeffizienz von W/W-WP mit verschiedenen Kältemitteln nach Leistung (Designtemperatur 55°C)



Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf Daten der Salzburger Landesregierung (2021) und Hauteq Datenblätter

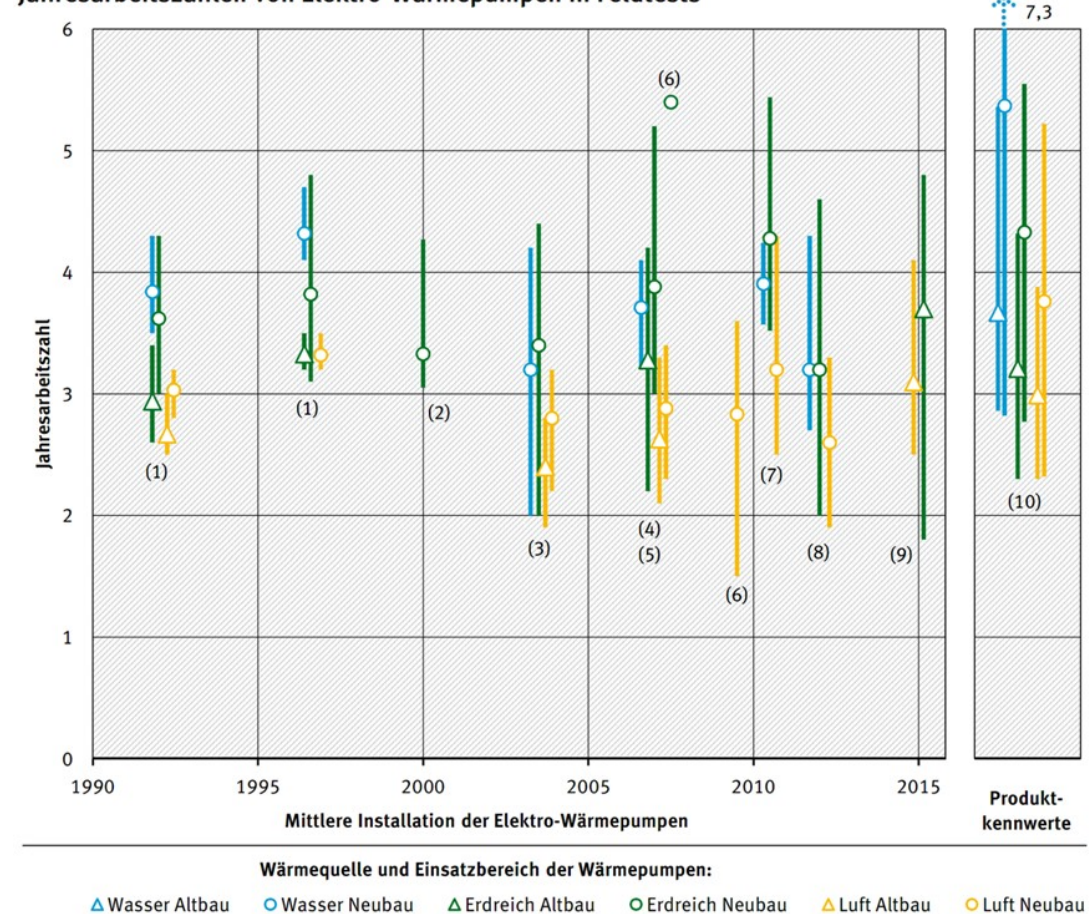
3.3.4 Feldstudien

Berechnete Werte muss man unterscheiden von Werten, die in Feldstudien ermittelt wurden. Feldstudien ermöglichen eine Ermittlung von Arbeitszahlen unter realen Bedingungen. Ein direkter 1 zu 1 Vergleich von Wärmepumpen und Anwendungen ist aufgrund von praktischen Unterschieden in Anlagenausführung, Installation und dem Betrieb dabei nur schwer möglich. Einflussfaktoren für den effizienten Betrieb bzw. die Anlagenausführung lassen sich bestimmen und eine Aussage zu tatsächlich realisierbaren JAZ ist möglich. Für energieeffizienten Betrieb der Wärmepumpensysteme kommt sorgfältiger, sachgemäßer Planung und Ausführung wie auch der angemessenen Nutzung der gesamten Heizungs- und Trinkwarmwassersysteme eine wesentliche Rolle zu.

Abbildung 24 zeigt eine Übersicht der Ergebnisse verschiedener Feldtest-Projekte. In den Feldtests bestätigt sich die höhere Effizienz von S/W-WP und W/W-WP im Vergleich zu L/W-WP und die bessere Eignung der WP im Neubau im Vergleich zur Sanierung. Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse eine große Varianz innerhalb der einzelnen Wärmepumpentypen, d.h. dass beispielsweise die im Feld gemessenen JAZ für S/W-WP zwischen 2 und 4 variierten.

Abbildung 24: Jahresarbeitszahlen von Wärmepumpen in Feldtests

Jahresarbeitszahlen von Elektro-Wärmepumpen in Feldtests



Hinweise:

- Das Diagramm zeigt jeweils den Mittelwert (Symbole) sowie die Bandbreite (Balken) der festgestellten Jahresarbeitszahlen.
- Die Jahresarbeitszahlen stammen aus mehreren Feldtests. Die Nummer steht jeweils im Diagramm in Klammern und im Quellenverzeichnis.
- Die Fallzahlen der Feldtests unterscheiden sich stark und sind bei den Quellen angegeben.
- Die Installation der Wärmepumpen erstreckte sich über Zeiträume von vier bis sechs Jahren. Die Feldtests sind zum mittleren Zeitpunkt der Installation der Wärmepumpen eingetragen.
- Die Jahresarbeitszahlen umfassen, soweit die Angaben der Feldtests ausreichen, die Wärmeerzeugung für Raumwärme und Warmwasserbereitung (ohne Speicherverluste) und die dafür eingesetzte Energie (Wärmepumpe inkl. Hilfsantriebe ohne Heizungsumwälzpumpe) - "Erzeuger-Arbeitszahl" genannt.
- Die Wärmepumpen wurden in Wohngebäuden installiert, hauptsächlich in Einfamilienhäusern.
- Die Unterscheidung zwischen Neubau und Altbau ist nur fließend möglich und dient daher ausschließlich der Orientierung. Neubau meint überwiegend Fußbodenheizung mit geringen Vorlauftemperaturen bis 35 °C. Altbau (teilsaniert bis unsaniert) meint überwiegend Heizkörperheizung mit höheren Vorlauftemperaturen im Bereich von etwa 35...55 °C.
- Die Produktkennwerte für die Energieverbrauchskennzeichnung gemäß Verordnung (EU) Nr. 811/2013 beruhen auf Messungen auf Prüfständen und Berechnungen. Sie werden deshalb abgesetzt dargestellt. Die Jahresarbeitszahlen wurden mit Anteilen für Raumwärme/Warmwasserbereitung von 80/20 Prozent im Altbau und 70/30 Prozent im Neubau gemittelt.

Quellen:

- (1) R. Heidelck, Primärenergiebedarf und Treibhausgasemissionen von modernen Wärmepumpen, Informationszentrum Wärmepumpen und Kältetechnik e.V., Hannover 2000 (88 Anlagen)
- (2) M. Ewert, Feldtest bestätigt hohe Effizienz von Wärmepumpen, in: HLH 3/2005, S. 24ff. (14 Anlagen; ohne andere Anlagentypen bzw. nicht ausgewertete Anlagen)
- (3) F. Auer, H. Schote, Zweijähriger Feldtest Elektro-Wärmepumpen am Oberrhein, Agenda Gruppe Lahr 2008 (33 Anlagen; ohne Warmwasser-Wärmepumpen)
- (4) C. Russ et al., Feldmessung Wärmepumpen im Gebäudebestand, Freiburg 2010 (71 Anlagen; nur Anlagen für Raumwärme und Warmwasser)
- (5) M. Miara et al., Wärmepumpen Effizienz, Freiburg, Februar 2011 (112 Anlagen)
- (6) F. Auer, H. Schote, Feldtest Wärmepumpen: Wärme aus der Umwelt auch gut für die Umwelt?, Agenda Gruppe Lahr 2014 (7 Anlagen; nur Anlagen mit passender Bilanzgrenze und Anwendungsbereich; ohne andere Anlagentypen)
- (7) M. Miara et al., Wärmepumpen-Monitor, Freiburg 2014 (37 Anlagen; ohne aus (5) fortgeführte Anlagen)
- (8) A. Bergmann, H. Erhorn, Energieeffizienz elektrisch angetriebener Wärmepumpen - Praxisergebnisse aus dem Monitoring, Fraunhofer IBP Mitteilung 44, Stuttgart 2017 (23 Anlagen; nur Anlagen mit passender Bilanzgrenze)
- (9) D. Günther, M. Miara, Feldtests bestätigen Potenzial von Wärmepumpen, in: HLH 3/2018, S. 25ff. (27 Anlagen; inkl. Ausreißern, teilweise mit Fußbodenheizung)
- (10) VdZ e.V., Datenbank Heizungslabel.de, Sonderauswertung für das Umweltbundesamt, Berlin 2017

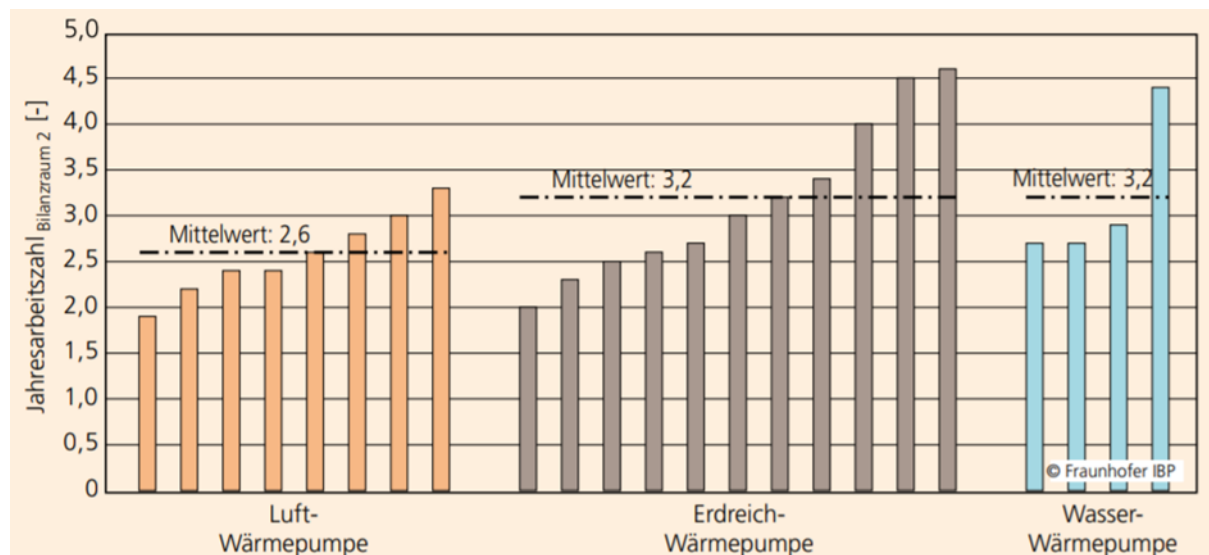
Grafik: Umweltbundesamt (April 2018)

Quelle: Umweltbundesamt (Schuberth, 2021)

Feldtest des Fraunhofer IBP (im Rahmen des BMUB-Forschungsprojekt „Modellprojekte im Effizienzhaus Plus-Standard“, Bergmann et al, 2017):

- Messobjekte: installierte Heizleistung der Wärmepumpen zwischen 1,5 Kilowatt und 20 Kilowatt in Einfamilienhäusern sowie von 7 Kilowatt bis 120 Kilowatt in Mehrfamilienhäusern über zwei Jahre. Entsprechend Effizienzhaus Plus-Standard war die Voraussetzung der Teilnehmer an der Messung eine negative Bilanz bezüglich Jahres-Endenergie sowie Jahres-Primärenergiebedarf, durch Überschuss der auf den Grundstücken erzeugten erneuerbaren Energie.
- Ermittelte JAZ (Abbildung 25):
 - Die Messungen erfolgten für die Bilanzräume Wärmepumpen-Anlage und Wärmepumpen-Heizungsanlage (siehe Abbildung 17). Die Messungen der gesamten Heizungssysteme einschließlich Heizungs- und Trinkwarmwasserverteilung ergaben geringere Jahresarbeitszahlen (Speicherverluste und Energieverbrauch der Pumpen).
 - 12 L/W-WP: mittlere JAZ von 2,6 (von 1,9 bis 3,3)
 - 13 erdreichgekoppelte (S/W-)WP: mittlere JAZ von 3,2 (von 2,0 bis 4,6)
 - 7 W/W-WP: mittlere JAZ von 3,2 (von 2,0 bis 4,6)
 - Somit erreichten nur wenige Wärmepumpensysteme die Zielvorgaben des Erneuerbare-Energien-Wärmegesetzes, das für Wärmepumpen mit Trinkwarmwasserbereitung eine Jahresarbeitszahl von mindestens 3,3 und für alle übrigen Wärmepumpen von 3,8 vorsah.

Abbildung 25: Praktische Jahresarbeitszahl für verschiedene Wärmepumpentypen



Quelle: Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP (Bergmann & Erhorn, 2017)

- Weitere Erkenntnisse der Studie (Bergmann & Erhorn, 2017):
 - Geringere JAZ als erwartet durch
 - hohe Stand-by-Verluste, wenn Anlagenteile das ganze Jahr über in Betrieb waren,

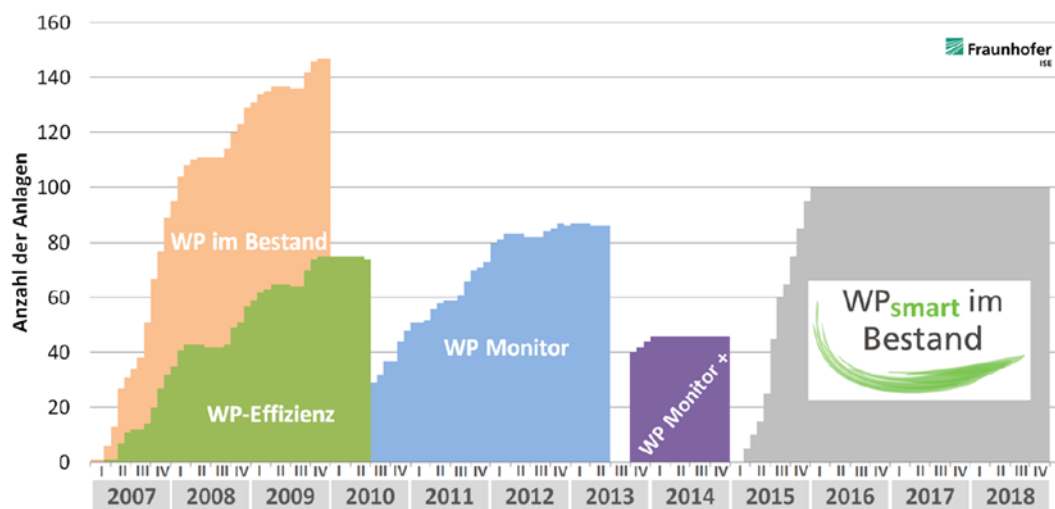
- erhöhte Systemtemperaturen, z.B. durch höhere Innentemperaturen oder hohen Trinkwarmwasserbedarf, bzw. hohe Trinkwarmwassertemperaturen zur Vermeidung von Legionellen und fehlenden/schlechten hydraulischen Abgleich.
- Optimierungspotenzial bestand durch:
 - Bessere Regelstrategien
 - Eine bessere Anlagenplanung, die Überdimensionierungen vermeidet
 - Nachjustieren von Betriebsparametern, z.B. der Vorlauftemperaturen
 - Austausch der Heizverteilsysteme

Insgesamt ist die JAZ auch abhängig davon, wie hoch der Anteil der Trinkwarmwasserbereitung ist. Je größer, z.B. bei stark gedämmten Gebäuden, desto schlechter die JAZ.

Das **Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE)** führt seit 2007 verschiedene Wärmepumpen-Monitoring Projekte durch, siehe Abbildung 26. Die Erkenntnisse der Feldtests durch Fraunhofer ISE flossen beispielsweise auch in die Berechnung der JAZ auf Basis der VDI 4650 ein.

Einige relevante Vorhaben mit Feldversuchen werden im Folgenden kurz beschrieben.

Abbildung 26: Übersicht der WP-Monitoring Projekte des Fraunhofer ISE



Quelle: Fraunhofer ISE

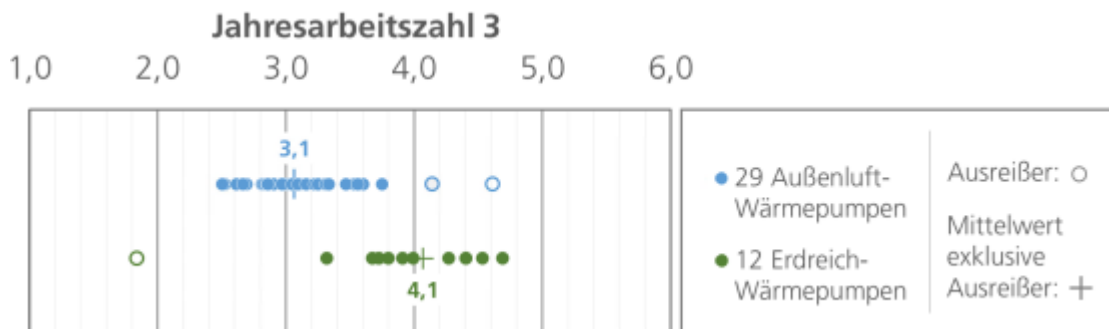
Ergebnisse aus dem Feldtest von Juli 2018 bis Juni 2019 des Fraunhofer ISE, Forschungsprojekt „WPsmart im Bestand“ (D. Günther, Wapler, Helmling, & Miara, 2020):

- ▶ 29 L/W-WP: mittlere JAZ von 3,2 bei COP-Werten der Wärmepumpen mit fest eingestellter Drehzahl (fixed speed) von 3,2 bis 4,2 (bei A2/W35). Geringe Rolle der Elektroheizstäbe auf die Energieverbräuche – auf die Verdichterarbeit bezogene relative Heizstarbeit 1,9 Prozent.
- ▶ 12 erdreichgekoppelte (S/W-)WP: mittlere JAZ von 4,1 (von 3,3 bis 4,7, ohne Ausreißer bei 1,8)

► Vielzahl weiterer Einflussfaktoren

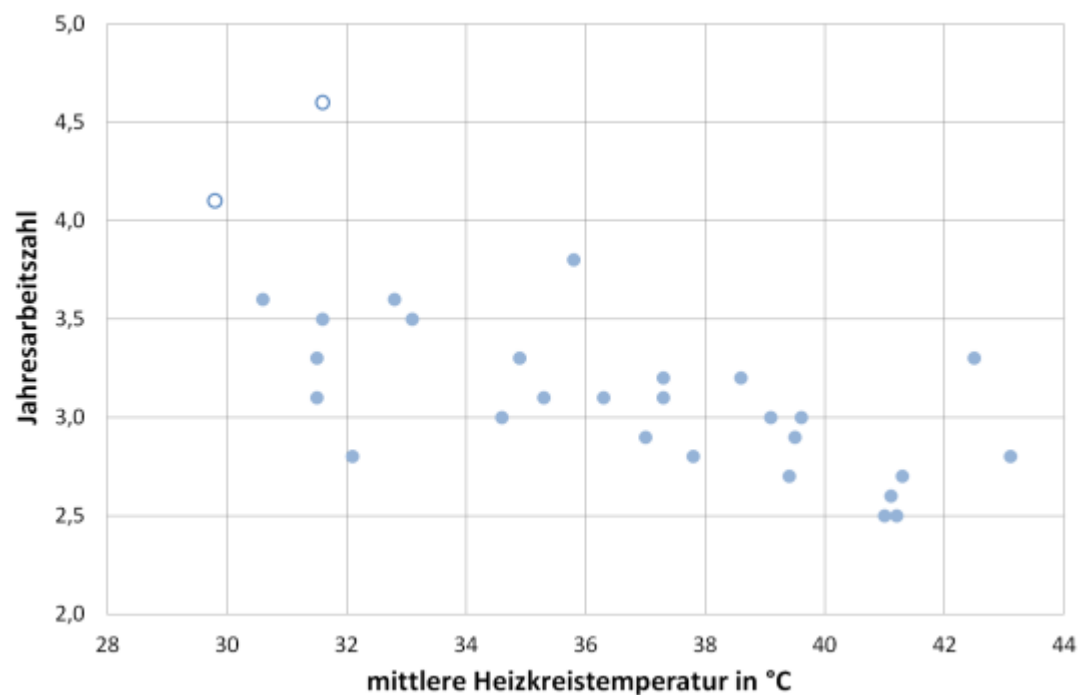
Die beiden nachfolgenden Abbildungen geben eine Übersicht über die ermittelten JAZ aus den ISE-Feldtests:

Abbildung 27: Darstellung der in Feldtests durch Fraunhofer ISE ermittelten Jahresarbeitszahlen (JAZ)



Quelle: Fraunhofer ISE (D. Günther et al., 2020)

Abbildung 28: Darstellung der Jahresarbeitszahlen (JAZ) in Feldtests durch Fraunhofer ISE nach mittlerer Heizkreistemperatur für L/W-WP



Quelle: Fraunhofer ISE (D. Günther et al., 2020)

Durch Bergmann et al (2017) im Förderprogramm Effizienzhaus Plus des BMUB gemessene Jahresarbeitszahlen sind im Mittel geringfügig niedriger als Messungen im Jahr 2011 durch Fraunhofer ISE (Miara, Günther, Kramer, Oltersdorf, & Wapler, 2011), aber grundsätzlich auf vergleichbarem Niveau. Deutlich höhere JAZ wurden hingegen im Forschungsprojekt „WPsmart im Bestand“ gemessen (D. Günther et al., 2020).

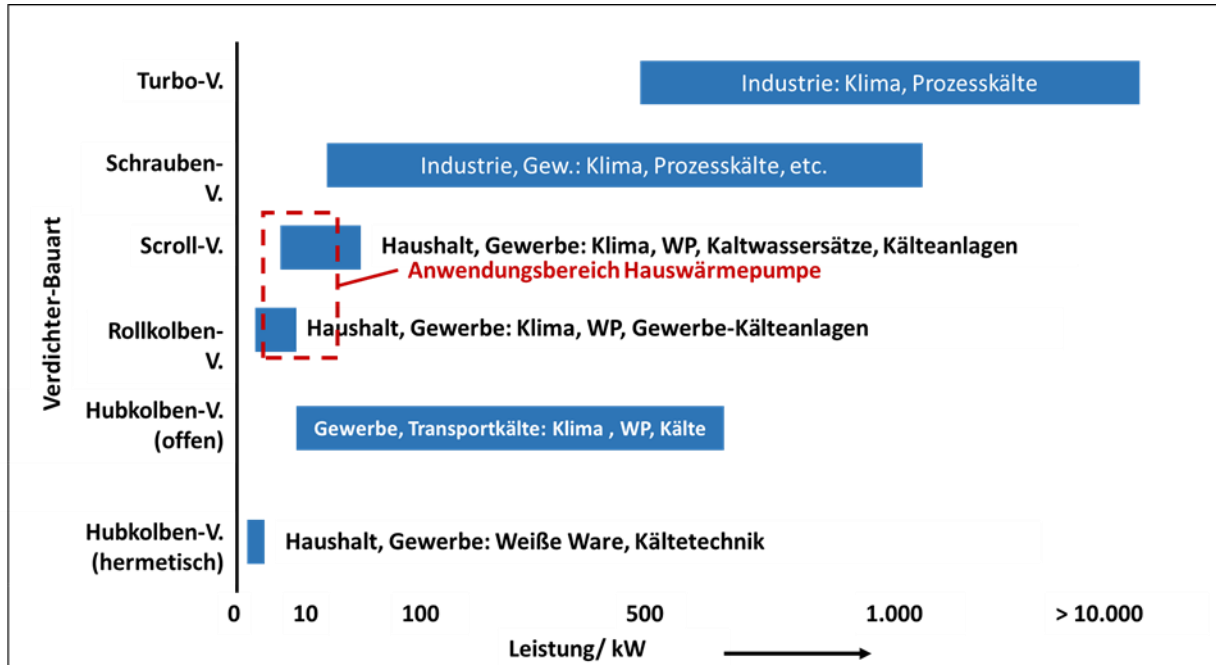
3.3.5 Bauteile mit Relevanz für den effizienten Betrieb einer Wärmepumpe

Im Folgenden wird eine kurze Beschreibung der Komponenten und eine Abschätzung des Einflusses auf die Energieeffizienz und zu möglichen Innovationspotenzialen vorgenommen.

Verdichter

Der Verdichter ist quasi „das Herz“ der Wärmepumpe. In der Abbildung 29 ist eine Übersicht über Verdichterbauarten und deren Einsatzbereich nach Leistung und Anwendung dargestellt.

Abbildung 29: Verdichter-Bauarten und Einsatzbereiche



Quelle: ETSuS UG, Kulmbach

Für den Anwendungsbereich der Hauswärmepumpen kommen fast ausschließlich Rollkolbenverdichter und Scrollverdichter zum Einsatz. Hubkolbenverdichter wurden (bzw. werden vereinzelt noch) in Brauchwasserwärmepumpen eingesetzt, sind jedoch von der Effizienz unterhalb der Rollkolbenverdichter einzustufen und werden daher auch nicht in Heizungswärmepumpen eingesetzt. Aufgrund der langen Historie beim Einsatz von Kohlenwasserstoffen in der weißen Ware (Kühlschränke und Gefriergeräte) existiert eine große Auswahl an Hubkolbenverdichtern für diesen Bereich. Dagegen stellt die Anzahl serienreifer Rollkolben- und Scrollverdichter für natürliche Kältemittel zum Teil noch eine Barriere dar (siehe auch Kapitel 2.3.4).

Drehzahlgeregelte Verdichter sind ein technischer Standard für Wärmepumpen mit hoher Effizienz. Das Verhalten bei Teillast durch unterschiedliche Betriebsbedingungen ist energetisch günstiger als bei Fix-Speed Verdichtern mit fester Drehzahl, die im On-Off-Betrieb geregelt werden.

Aktuelle Projekte, wie das Forschungsvorhaben „LC150 Entwicklung eines kältemittelreduzierten Wärmepumpenmoduls mit Propan“, das das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE mit Unterstützung eines Industriekonsortiums europäischer Wärmepumpenhersteller durchführt (Fraunhofer ISE, 2021), zu Systemen mit natürlichen Kältemitteln beinhalten zum Teil auch Untersuchungen zu Verdichtern und deren Weiterentwicklung. Sie zielen auch darauf, die Füllmenge des Kältemittels, u. a. durch Reduktion der notwendigen Ölmengen, zu reduzieren (Dankwerth, Methler, Schnabel, & Schossig, 2020). Hinsichtlich der Systemeffizienz ist weitere Forschung und Entwicklung notwendig, da sich die Effizienz der Komponenten und der gesamten Wärmepumpe ggf. bei geringeren Füllmengen verschlechtert.

Alle in Hauswärmepumpen üblichen Verdichter benötigen für den sicheren Betrieb Öl zur Schmierung der bewegten Bauteile (siehe auch Kapitel 3.2.3). Andere Verdichter-Bauarten sind in der Erprobung, wie z.B. ölfreie Radialverdichter kleiner Leistung, vom technischen Reifegrad sind diese noch im TRL-Bereich (Technologie-Reifegrad) von 4 bis 5 einzustufen (von Versuchsaufbau im Labor bis Versuchsaufbau in Einsatzumgebung) von maximal erreichbarem Reifegrad bei TRL 9).

Wärmeübertrager

Wärmeübertrager werden in Wärmepumpen auf der Wärmequellen- und der Wärmesenkenseite und ggf. als innere Wärmeübertrager im Kältemittelkreislauf eingesetzt. Der erste Wärmetauscher entzieht der Wärmequelle die Wärmeenergie und überträgt sie an das Kältemittel; der zweite überträgt die Wärmeenergie des Kältemittels dann und führt sie beispielsweise dem Wasser für den Heizkreislauf zu. Je nach Verwendungszweck gibt es unterschiedliche Bauarten, so dass das Medium entweder an Platten, Lamellen oder anderen Oberflächen erhitzt oder abgekühlt wird. Große Wärmeübertragerflächen erhöhen grundsätzlich die Effizienz, führen aber zu einem höheren Materialaufwand und größerer Kältemittelfüllmenge. Kleinere Rohrdurchmesser erhöhen ggf. die Wärmeübertragungskoeffizienten und verringern die Füllmenge, führen aber aufgrund des höheren Druckverlustes zur Verringerung des COP.

1. Verflüssiger/Hochdruckseite (Wärmesenkenseite im Wärmepumpenbetrieb):
 - a. Als Verflüssiger zur Erwärmung von Heizungswasser bzw. als Enthitzer³¹ zur Brauchwasserbereitung kommen bei Wärmepumpen auf der Hochdruckseite (im Wärmepumpenbetrieb) fast ausschließlich gelötete Plattenwärmeübertrager (PWT) zum Einsatz. Für diesen Anwendungsfall der Wärmeübertragung von Gas/Flüssig zu Flüssig hat sich diese Bauform als Optimum im Spannungsfeld Effizienz, Bauteilgröße und Materialeinsatz sowie Kosten etabliert. Innovationen finden u. a. im Bereich der Plattengeometrien, der Oberflächenstrukturen und der Aufteilung der Flächenverhältnisse innerhalb des PWT statt. Bei größeren Leistungen ist die Verteilung des Kältemittels ggf. problematisch, für den Leistungsbereich der Hauswärmepumpe spielt die schlechte Kältemittelverteilung nur eine untergeordnete Rolle.
 - b. Bei L/L-WP kommen üblicherweise Lamellen-Wärmeübertrager (LWT) zum Einsatz. Microchannel-Wärmeübertrager sind für diesen Anwendungsfall auf der Verflüssigerseite grundsätzlich geeignet (siehe 2b).
2. Als Verdampfer auf der **Niederdruckseite** (im Wärmepumpenbetrieb) werden unterschiedliche Bauarten von Wärmeübertragern je nach Wärmepumpentyp eingesetzt. Die Verdampfung des Kältemittels ist mit Hinblick auf einen Wärmeübertrager ein komplexerer Vorgang als das Verflüssigen. Die gleichmäßige Verteilung des Kältemittels als Nassdampf (d.h. als Gas/Flüssigkeitsgemisch) auf die Wärmeübertragungsflächen ist technisch anspruchsvoll.
 - a. Bei L/W-WP kommen LWT zum Einsatz. Der Wärmeübergang von der Luft auf die Metalloberfläche ist sehr viel schlechter als derjenige der siedenden Flüssigkeit. Damit gibt auch die Luftseite die benötigte Wärmeübertragungsfläche vor. Bei Verdampfungstemperaturen unter 0°C und höherer absoluter Luftfeuchte (dies ist im Lufttemperaturbereich von ca. -5°C bis +5°C besonders relevant) vereist der Verdampfer. Dadurch verringert sich die Effizienz da die Verdampfungstemperatur sinkt und die luftseitig durchströmte Wärmeübertragungsfläche kleiner wird. Da auch der

31 Als Enthitzer wird ein Wärmeübertrager bezeichnet, der dem gasförmigen Kältemittel nach dem Verdichter Wärme entzieht, ohne das Kältemittel zu verflüssigen. Der Vorteil liegt in der Nutzung des hohen Temperaturniveaus oberhalb der Verflüssigungstemperatur zur Bereitstellung der Brauchwassertemperaturen, die oberhalb der Heizungsvorlauftemperaturen liegen.

- Luftwiderstand größer wird, arbeitet der Lüfter nicht mehr so effizient. Zur Kompensation kann die Drehzahl des Lüfters erhöht werden, dies führt jedoch ggf. zu größerer Lärmbelastung. Die bedarfsgerechte effiziente Abtauung hat großen Einfluss auf die Effizienz der Wärmepumpe.
- b. Sehr hohe Effizienzen der Wärmepumpe lassen sich grundsätzlich durch große Wärmeübertragungsflächen realisieren. Die praktische Umsetzung findet bei Geräten mit sehr hohen Leistungszahlen durch den Einsatz horizontaler Verdampfer statt. Dies ist positiv für die Effizienz, erhöht aber den Materialaufwand und ist ungünstig im Hinblick auf geringe Kältemittelfüllmengen. Der Einsatz von Microchannel-Wärmeübertragern wäre als Alternative grundsätzlich möglich. Diese Lösung ist in der Praxis noch nicht etabliert, da sowohl die Kältemittelverteilung wie auch das Vereisungs- und Abtauverhalten noch nicht zufriedenstellend gelöst sind.
 - c. Als Verdampfer bei S/W-WP- und W/W-WP werden vorrangig PWT eingesetzt. Die zuvor gemachten Ausführungen zur technischen Weiterentwicklung (PWT und Einsatz als Verdampfer) gelten entsprechend. Andere Bauformen u.a. bei Direktverdampfer-Anlagen sind möglich, allerdings bei Standard-Hauswärmepumpen nicht üblich.
3. Innere Wärmeübertrager werden eingesetzt, um z.B. die Effizienz der Wärmepumpe zu erhöhen oder Teilprozesse in der Anlage wie Zwischeneinspritzung am Verdichter zur Verbesserung der Einsatzgrenzen (z. B. Electronic Vapour Injection, (EVI)-Prozess) zu optimieren (zu Lasten des Materialaufwandes). Ob der Einsatz eines inneren Wärmeübertragers zur Erhöhung der Effizienz führt, ist vom eingesetzten Kältemittel abhängig. Verschiedene thermodynamische Größen wie der Isentropenexponent, die spezifische isobare Wärmekapazität und die spezifische Entropie im Ansaugzustand des Verdichters haben einen Einfluss darauf, ob der Einsatz eines inneren Wärmeübertragers sinnvoll ist. Eine Überprüfung erfordert in der Regel messtechnische Untersuchungen an der ausgeführten Anlage. Eine ökonomische Betrachtung erfordert die Abwägung der Mehrkosten zu möglichen Effizienzsteigerungen und daraus ableitbaren Vorteilen für den Endverbraucher und in der Vermarktung.

Expansions- (Drossel)-organe

Die primäre Aufgabe der Expansionsorgane in einer Wärmepumpe (bzw. Kälteanlage) ist die Entspannung vom Hochdruck auf den Niederdruck. Grundsätzlich kann die Entspannung durch Drosselung oder Entspannungsmaschinen (arbeitsleistend) erfolgen. Die sekundäre, für den effizienten Betrieb einer Wärmepumpe wichtige Eigenschaft ist die Regelung der Überhitzung (siehe unten Abschnitte zu Expansionsventilen).

Bei der arbeitsleistenden Entspannung besteht prinzipiell die Möglichkeit den Kreislauf energetisch zu verbessern, allerdings ist die Umsetzung sehr aufwendig. Bei Geräten mit überkritischem Betrieb (bspw. R744) oder bei Gas-Kälteprozessen ist eine Verwendung von Expansionsmaschinen eher vorteilhaft als bei Kaltdampf-Kälteanlagen.

Die Drosselung ist die häufigste Methode bei heutigen Hauswärmepumpen. Je nach Einsatzbereich, Anwendung und Kältemittel kommen unterschiedliche Drosselorgane zum Einsatz. Die wichtigsten werden im Folgenden beschrieben.

- Kapillarrohre werden bei Geräten kleiner Leistung (deutlich unterhalb 1 Kilowatt) mit relativ konstanten Betriebsbedingungen und ohne große Lastschwankungen eingesetzt (z. B. Haushaltskühlschränke). Die kostengünstige Lösung erlaubt einen stabilen Betrieb unter den oben angegebenen Bedingungen, ist aber weniger gut geeignet bei schwankenden Bedingungen und zum Erreichen guter Effizienzwerte (eine Überhitzungsregelung ist nicht möglich).

- Thermostatische Expansionsventile (TEV) haben im Gegensatz zu Kapillarrohren einen veränderlichen Drosselquerschnitt. Dies hat den Vorteil, dass der Kältemittelmassenstrom an die jeweiligen Betriebsbedingungen angepasst wird und der Verdampfer möglichst optimal ausgenutzt wird. Das Ziel ist es, die Überhitzung (Temperaturdifferenz am Verdampferausstritt zur Satttemperatur bei Verdampfungsdruck) zu minimieren. Das ist gleichbedeutend mit einer guten Ausnutzung der Wärmeübertragungsflächen. Gleichzeitig ist sicherzustellen, dass kein flüssiges Kältemittel vom Verdichter angesaugt wird, um Schäden am Verdichter zu vermeiden. Das TEV benötigt eine statische Überhitzung von mindestens 3 bis 5 Kelvin, die sich nicht weiter minimieren lässt. Die Anpassung der Arbeitsüberhitzung erfolgt in einem geschlossenen Regelkreis ohne zusätzliche Hilfsenergie mit annähernd proportionaler Regelcharakteristik. TEV ermöglichen einen stabilen Betrieb über einen weiten Einsatzbereich der Wärmepumpe, sind aber im Regelverhalten mit Hinblick auf Regeldynamik und maximale Effizienz elektronischen Expansionsventilen unterlegen.
- Elektronische Expansionsventile (EEV) benötigen eine Hilfsenergie zur Betätigung des Stellantriebes für die Ventilöffnung. Sie verfügen über einen elektronischen Regler mit PID-Charakteristik (PID: Proportional-Integral-Differential) zur Ansteuerung des Stellantriebes. Zur Bestimmung der Überhitzung ist eine Temperatur- und Druckmessung am Verdampferausgang notwendig. EEV ermöglichen eine dynamische und effiziente Regelung der Überhitzung und des Kältemittelmassenstroms. In Kombination mit drehzahlregulierten Verdichtern lässt sich die Wärmepumpe so über den gesamten Anwendungsbereich energetisch optimiert betreiben. Das Gesamtsystem ist regelungstechnisch komplex und erfordert einen hohen Aufwand bei der Entwicklung eines Seriengerätes.

Weitere Anlagenkomponenten

Je nach Wärmepumpentyp, Anwendung und eingesetztem Kältemittel kann die Ausführung der Anlage durch weitere Komponenten ergänzt werden (u.a. Pumpen, Ölabscheider, Zwischenkühler, Ventile, Armaturen, Mitteldruckbehälter etc.). Die Gründe können z.B. die Verbesserung der Einsatzgrenzen oder die Erhöhung der Effizienz sein. Die Komplexität der Anlagen vor allem bei der Verwendung von R744 ist zum Teil erheblich und führt zu einem hohen Material-, Regelungs- und Kostenaufwand (siehe 3.2.2 zu Kohlenstoffdioxid).

Bei S/W-WP und W/W-WP erhöht der Einsatz von modulierenden Umwälzpumpen die Effizienz. Die Gründe liegen im geringeren Energieverbrauch der Pumpen und dem besseren Regelverhalten im Teillastbetrieb durch die Anpassung der Drehzahlen und daraus resultierenden Volumenströme. So lassen sich Strömungsverluste minimieren und die Temperaturdifferenzen in den Wärmeübertragern optimieren.

3.3.6 Regelung, Monitoring und Integrierbarkeit

Die Regelung der Wärmepumpe im Heizsystem hat Einfluss auf verschiedene Aspekte bei dem Betrieb von Hauswärmepumpen, wie u.a. die Energieeffizienz, die Benutzerführung und das Benutzerverhalten, die Geräuschemissionen.

Hervorzuheben sind die folgenden Möglichkeiten, die bereits herstellerseitig berücksichtigt werden können:

- Anpassung der Drehzahlen im Teillastbetrieb und Anpassung der Systemtemperaturen und Temperaturspreizung in Abhängigkeit der Heizlast.
- die Optimierung der Abtauung bei L/W-WP

- Die Unterstützung der Installation durch geführte Prozesse einschließlich der relevanten Informationen zur sicheren und effizienten Aufstellung ist für den Installateur wesentlich. Die Unterstützung des hydraulischen Abgleiches durch die Regelung erleichtert die Inbetriebnahme und ist die Voraussetzung für den effizienten Anlagenbetrieb.
- Eine Zielgruppen-optimierte Regelung unterstützt den Betreiber beim effizienten und sicheren Betrieb. Dazu gehören die Überwachung und ggf. Optimierung der Systemtemperaturen z. B. Vorlauf- bzw. Brauchwassertemperaturen, Belegungserkennung und Absenkbetrieb (sowohl zur Leistungsreduzierung aber auch zur Reduktion von Geräuschemissionen durch Absenkung der Drehzahlen)

Hydraulischer Abgleich

Um den effizienten Betrieb einer Heizungsanlage zu gewährleisten, muss das hydraulische System optimal eingestellt sein. Ist dies nicht der Fall, werden die Wärmeübergabeeinrichtungen (Heizkörper, Flächenheizung etc.) über- bzw. unterversorgt. Die Folgen können u.a. schlechte Regelbarkeit, verzögertes Aufheizen, ungenügende Leistung im Vollastbetrieb und erhöhte Vorlauftemperaturen sein. Dies hat einen negativen Einfluss auf die Effizienz und den Komfort. Zur Durchführung des hydraulischen Abgleiches ist es erforderlich, dass die Volumenströme durch die Wärmeübergabeeinrichtungen auf den Heizbedarf abgestimmt sind. Hierzu werden die Heizlasten je Raum und die Druckverluste der Anlage ermittelt und die notwendigen Durchflüsse (Massenströme) durch Anpassung der Ventile und Pumpen bzw. deren Einstellung entsprechend den Kennlinien eingestellt. Die Durchführung des hydraulischen Abgleiches ist eine notwendige Voraussetzung für alle Fördermaßnahmen zur Heizungsoptimierung gemäß BEG.

Integrierbarkeit bedeutet in diesem Zusammenhang, dass Wärmepumpen in Smart Grids oder in Quartierslösungen oder Nahwärmenetze eingebunden werden können. Die Einbindungsfähigkeit in Smart Grids ist für viele Wärmepumpen bereits durch das **SG-Ready Label** dokumentiert (siehe Kapitel 1.4.2). Smart Grid (SG) Ready besteht aus vier Steuerpunkten: zwingende An-/Abschaltung sowie je nach Bedarf optionale An-/Abschaltung des Wärmepumpenbetriebs. Praktisch ist die SG-Ready Funktion aber bislang kaum relevant, da es derzeit keinen Preismechanismus auf der Stromseite gibt, der einen Anreiz für die Einbindung schafft. Ziel der Einbindung in Smart Grids sollte es sein, die Wärmepumpe besonders preisgünstig zu betreiben. Gleichmaßen kann ein besonders CO₂-armer Betrieb daraus abgeleitet werden. Bisher wirkt sich intelligente Steuerung des Wärmepumpenbetriebs in Kombination mit vor Ort erzeugter erneuerbarer Energie finanziell vorteilhaft aus, indem durch bessere Kopplung von Angebot und Nachfrage der Eigenverbrauch der Eigenstromanlage erhöht wird. Vorteilhaft beim Demand Side Management (DSM), d. h. Lastmanagement in Smart Grids, ist auch, dass bei reversiblen Wärmepumpen eine ganzjährige Integrierbarkeit gegeben ist.

Das **Monitoring** umfasst die Messung und Anzeigen von bestimmten Betriebszuständen, Parametern und Kennzahlen, die eine Bewertung des Anlagenbetriebs hinsichtlich Effizienz und Optimierungsmöglichkeiten zulassen. Das Monitoring der Wärmepumpen kann einen signifikanten Beitrag zur Verbesserung der Effizienz leisten. Eine **Effizienzanzeige** mit Feedback an die Betreiber*innen wird als Mindestanforderung für Raumheizgeräte daher auch für die Überarbeitung der entsprechenden Ökodesign-Richtlinien empfohlen (Hermann et al., 2019; Schuberth et al., 2018).

Voraussetzung für die Förderung von Wärmepumpen durch das BAFA ist aktuell schon, dass förderfähige Wärmepumpen über eine Verbrauchs- und Wärmemengenerfassung verfügen (BAFA, 2020). In der Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) wird explizit verlangt, dass

bis spätestens 1. Januar 2023 förderfähige Heizsysteme mit einer Energieverbrauchs- und Effizienzanzeige ausgestattet sind (BMWi, 2021; KfW, 2021b).

3.4 Geräuschemissionen

3.4.1 Grundlagen

Insbesondere die außen aufgestellten L/W-WP verursachen Betriebsgeräusche, die in Wohngebieten als störend empfunden werden können. Leise und intelligent geregelte Wärmepumpen sind daher zu bevorzugen. L/W-WP in Split-Bauweise können etwas leiser sein, wenn wesentliche Komponenten, insbesondere der Verdichter, in der Inneneinheit verbaut sind. Dies ist bei den gängigen, marktüblichen Split-L/W-WP jedoch nicht der Fall. S/W-WP und W/W-WP kommen ohne große Ventilatoren aus und sind zudem meistens innen aufgestellt, die Geräuschbelastung durch sie für den Außenbereich ist vernachlässigbar.

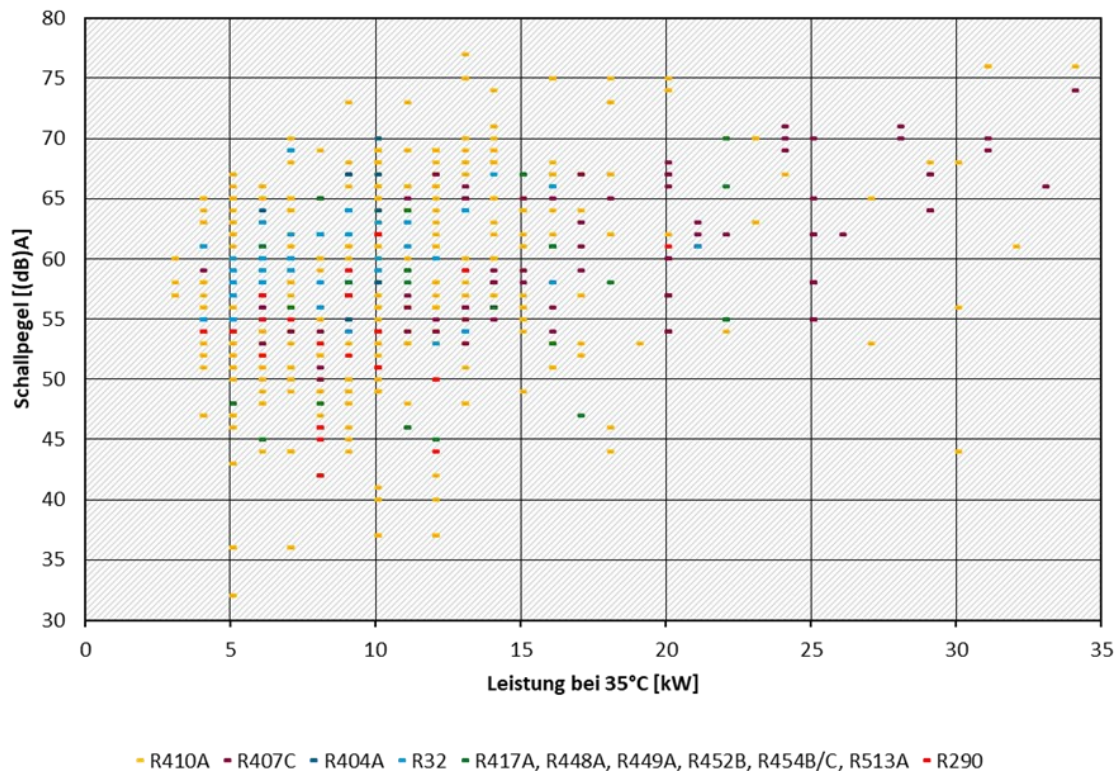
Bei innen aufgestellten S/W bzw. W/W-WP lässt sich die Schallübertragung der Verdichterlaufgeräusche über die Luft an die Umgebung durch schallisolierte Gehäuse gut reduzieren. Wesentlicher für die Reduktion der Schallemissionen ist bei diesen Geräten die Entkopplung der Schwingungen über die Befestigung am Boden und über die Verrohrung in der Verbindung zum Wärmeverteilsystem durch schwingungsdämpfende Elemente.

Bei der Geräuschbelastung spielt jedoch nicht nur der von den Herstellern verpflichtend anzugebende Schalleistungspegel nach EN 12102 (siehe Kap. 1.3.2.5) eine Rolle, sondern auch der Aufstellungsort, die Entfernung zum Nachbarn, die Ausrichtung der Wärmepumpe und der Abstand zu Wänden. Gerade bei kleinen Grundstücksgößen und Reihenhäusern ist die Wahl eines geeigneten Aufstellungsortes im Hinblick auf den Schutz der Anwohner und Nachbarn vor Lärm sehr wichtig.

Abbildung 30 zeigt die Schallpegel von L/W-WP mit verschiedenen Kältemitteln (Salzburger Landesregierung (2021)). Der Schallpegel ist mehr oder weniger unabhängig von der Leistung der WP. Bei größeren Leistungen gibt es weniger WP mit niedrigem Schallpegel. Ab 13 Kilowatt gibt es keine Geräte mehr unter 40 (dB)A, ab 20 Kilowatt sind mit einer Ausnahme keine Geräte mehr unter 50 (dB)A. In den Leistungsklassen bis 12 Kilowatt gibt es keinen Trend.

In Abhängigkeit vom Kältemittel lassen sich keine Trends erkennen. WP mit dem Kältemittel R290 haben eher geringe Schallpegel, allerdings nicht die niedrigsten.

Abbildung 30: Schallpegel von L/W-WP mit verschiedenen Kältemitteln nach Leistung (Designtemperatur 35°C)



Quelle: Salzburger Landesregierung (2021) und Hauteq Datenblätter

Die von den meisten Herstellern zusätzlich angegebenen maximalen Schallleistungspegel und Schallleistungspegel bei Nachtbetrieb können zusätzlich betrachtet werden; deren Messung erfolgt jedoch nicht nach einheitlichem Standard. Eine Überarbeitung des Standards wird daher empfohlen, um die Schallemissionen bei Maximallast angemessen zu berücksichtigen und volle Transparenz und Vergleichbarkeit herzustellen (siehe Kapitel 5.5).

Auch bei der Innenaufstellung könnten Geräusche als Belastung empfunden werden und daraus können sich besondere Anforderungen an die Wärmepumpe, deren Installation und Installationsort ergeben.

3.4.2 Bauteile und Regelungsmöglichkeiten zur Geräuschreduzierung

Als Maßnahmen zur Reduzierung des Schallpegels bieten sich vor allem die Entkopplung des Schalls durch Schwingungsdämpfer oder ähnliche Elemente, wie u.a. Gehäusedämmung und schallisolierte Verdichter an. Darüber hinaus kann durch intelligente Regelung und bei Luft-Wärmepumpen durch groß dimensionierte Wärmeübertrager (geringe Luftgeschwindigkeit) die Lärmbelastung verringert werden.

Regelung

Wärmepumpen, deren Verdichter- und Ventilatorendrehzahlen angepasst werden können, ermöglichen eine Leistungsanpassung im Teillastbetrieb. Dies bedeutet auch, dass die Leistung bewusst im „geräuschreduzierten“ oder „Nachtmodus“ angepasst werden kann, um eine gezielte Geräuschreduzierung zu bestimmten Zeiten zu erlangen. Eine automatische Umschaltung in den Nachtmodus, zum Beispiel zu den üblichen Ruhestunden von 22 Uhr bis 6 Uhr kann herstellereitig voreingestellt sein. Zusätzlich bieten einige Wärmepumpen auch den Installateur*innen und Betreiber*innen die Möglichkeit, diesen individuell einzustellen.

Die Optimierung der Abtaufunktion spielt ebenfalls eine wichtige Rolle, da vereiste Verdampfer lautere Betriebsgeräusche (Strömungsgeräusche durch höhere Luftgeschwindigkeiten und höhere Drehzahl des Motors) verursachen.

Ventilatoren

L/W-WP benötigen zur Wärmeübertragung Lüfter, die für die notwendige Luftströmung über den LWT sorgen. Ventilatoren im Leistungsbereich zwischen 125 Watt und 500 Kilowatt unterliegen der Ökodesign-Richtlinie. Neben der notwendigen Luftmenge muss der Ventilator auch den Druckverlust in der Wärmepumpe überwinden und bei innen aufgestellten Wärmepumpen auch den der Zuluft- und Abluftleitungen. Die Energieaufnahme des Ventilators geht in die Effizienzberechnung der Wärmepumpe ein. Als Bauarten kommen in Wärmepumpen Radialventilatoren und Axialventilatoren zum Einsatz. Der Ventilator muss hinsichtlich des Druckverlusts und Volumenstroms die Anforderungen des Systems erfüllen, und soll gleichzeitig für eine gleichmäßige Beaufschlagung der durchströmten Komponenten wie Wärmeübertrager und ggf. auch Filter sorgen. Das Zusammenspiel ist komplex und im praktischen Betrieb in der Gesamtanlage zu bewerten. Hinsichtlich der Antriebstechnik verfügen EC-Ventilatoren (EC: electronically commuted) über einen deutlich höheren Wirkungsgrad als AC-Ventilatoren (AC: alternating current). Die Drehzahlregelung der EC-Motoren wirkt sich positiv auf das Teillastverhalten der Wärmepumpe aus und ermöglicht eine Reduzierung des Schallpegels bei minimierter Drehzahl (bspw. im Nachtbetrieb).

Die Überdimensionierung von Ventilatoren ermöglicht niedrigere Drehzahlen und somit geräuschärmeren Betrieb.

Verdichter

Die Kapselung durch Schallschutzelemente (Hauben etc.) kann die Geräuschbelastung durch die Verdichter minimieren. Da viele Verdichter bereits über eine thermische Isolation verfügen, ist die zusätzliche Maßnahme ggf. nicht mehr sehr effektiv.

Gehäusedämmung und Rohrschwingung (Schallentkopplung)

Die Gehäuse von WP übertragen Körperschall. Die Verwendung von Schallschutzmatten kann diese Effekte minimieren. Die Übertragung von Schall durch die Bodenbefestigung der Wärmepumpen sollte durch entsprechende Isolationselemente reduziert werden. Gleiches gilt für die Entkopplung der Schwingungen, die durch die Rohre in das Gebäude übertragen werden. Schallschutzhauben

Schallschutzhauben können bei bereits installierten Wärmepumpen nachträglich installiert werden und so die Geräuschemissionen mindern. Solche Maßnahmen stellen jedoch einen erheblichen Kostenfaktor dar und verschlechtern ggf. auch die Effizienz (durch höhere Druckverluste der Luftströmung).

Installation

Fachpersonal sollte in Hinblick auf die Geräuschemissionen und daraus resultierenden Anforderungen an den geeigneten Aufstellungsort gut ausgebildet sein. Auch müssen die technischen Dokumentationen diesbezüglich Hinweise geben.

Es stehen auch Arbeitshilfen, wie der Leitfaden für die Verbesserung des Schutzes gegen Lärm bei stationären Geräten (LAI, 2013) und der Schallrechner des BWP (BWP, 2021c) zur Verfügung, die das Fachpersonal hierbei nutzen kann.

Bei Innenaufstellung muss eine gute Schallentkopplung sichergestellt werden.

3.5 Sonstige

Weitere regelungstechnische Eigenschaften und Funktionen, die sich positiv auf den Betrieb sowie Gesundheit und Umwelt auswirken und somit u.U. im Hinblick auf die Vergabekriterien des Umweltzeichens Blauer Engel eine Rolle spielen könnten, sind:

- ▶ Raumluftreinigung (für reversible WP, L/L-WP) zur Entfernung von Keimen und Feinstaubpartikeln. Neben der Anlagentechnik (Filter) ist eine Überwachung der Luftqualität notwendig.
- ▶ Leckagefrüherkennungssysteme können in das Sicherheitskonzept bei Verwendung brennbarer Kältemittel integriert werden. Hierbei kann entweder ein Gassensor verbaut sein, der das Abschalten der WP einleitet oder aber die WP schaltet sich ab, wenn bestimmte Systemparameter auf eine Leckage von Kältemitteln hinweisen. Darüber hinaus arbeiten Wärmepumpen bei zu geringer Kältemittelfüllmenge nicht mehr effizient (zu geringer Füllgrad der Wärmeübertragung, nicht ausreichende Unterkühlung oder zu große Überhitzung)
- ▶ Erweiterte Sektorkopplung (Verbindung mit Solaranlagen, Batterien, hier z.B. die geräteübergreifende Kommunikation über EEBUS Schnittstellen)
- ▶ Weitere Cloudbasierte Funktionen mit Mehrwert für den Betrieb und den Nutzer, bspw. Wettervorhersagen, Predictive maintenance³² (mit Auswirkungen auf Energieeffizienz und Leckagen), Wartungsmanagement etc. Zusätzlich könnten selbst lernende Regelungen dazu beitragen, Kosten für Wartung und ggf. Reparatur zu verringern.

Ein Beispiel für weitere Konzepte, die für die Förderung von Wärmepumpen in Betracht gezogen werden könnte, ist der Einsatz von PVT (Verwendung von PV-Paneelen als Luftwärmeübertrager, Thermisch als Wärmequelle).

Kombination von Wärmepumpen mit Photovoltaik und Solarthermie (PVT)

PVT- bzw. Hybridkollektoren erzeugen sowohl Strom als auch Wärme. Ein Puffer- oder Kaltwasser-Speicher zwischen den PVT-Kollektoren und der Wärmepumpe dient in diesem Fall als Wärmequelle. In einem Projekt in der Schweiz (L-Sol) wurden PVT-Kollektoren sowohl zur Stromerzeugung als auch zur Wärmeerzeugung für die Wärmepumpe eingesetzt. Durch Systemsimulationen kam die Untersuchung zu dem Ergebnis, dass das Konzept eine sinnvolle Alternative zu L/W-WP in Einfamilienhäusern darstellt: „Durch den Einsatz von mit Wärmetauschern nachgerüsteten ‚normalen‘ PV-Kollektoren sind die Gesamtkosten des L-Sol-Systems über 20 Jahre in derselben Größenordnung wie bei einem L/W-WP-System“ (Sauter et al., 2020). Sowohl für Neubauten als auch für energetisch sanierte Einfamilienhäuser ergab sich ein geringerer Strombedarf (5 bis 30 Prozent) im Vergleich zu einer L/W-WP. Diese PVT-Technik wurde in den Niederlanden entwickelt und wird dort bereits eingesetzt. Da die Dachfläche einbezogen werden kann, keine Erdbohrung und kein Lüfter notwendig sind, birgt diese Lösung Potenzial insbesondere für Bestandsgebäude im städtischen Umfeld. Im Hinblick auf die Entwicklung von Kriterien für den Blauen Engel für Hauswärmepumpen sollte geprüft werden, ob und wie innovative Konzepte wie PVT einbezogen werden können.

³² Als Predictive Maintenance wird der Prozess der vorausschauenden Instandhaltung bezeichnet, der ausgehend von Maschinendaten mögliche Komponentenausfälle oder Fehlfunktionen prognostiziert und diese durch gezielte Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen rechtzeitig im Vorfeld verhindert.

4 Umweltwirkungen

Dieses Kapitel beschreibt die verschiedenen Umweltwirkungen und mögliche Umweltvorteile, zeigt relevante Schlussfolgerungen aus bestehenden Lebenszyklusanalysen auf und beschreibt schließlich die eigenen Analysen zu den Umweltwirkungen von Hauswärmepumpen in deren Lebenszyklus.

4.1 Überblick

Umweltwirkungen durch die Produktgruppe Hauswärmepumpen entstehen durch die Nutzung fossiler Energien – sowohl im Betrieb als auch in der Herstellung, im Transport und in der Entsorgung einschließlich Recycling –, durch die Nutzung von Kältemitteln, sowie durch die Herstellung und Entsorgung der Teile und der verwendeten Materialien.

Mögliche **Umweltvorteile** in der Produktgruppe Hauswärmepumpen können erreicht werden insbesondere durch die Verwendung natürlicher Kältemittel, die Steigerung der Energieeffizienz und der Langlebigkeit sowie die Verwendung von Materialien, die wiederverwendet werden können:

- ▶ **Verwendung eines natürlichen Kältemittels.** Natürliche Kältemittel haben kein oder nur sehr geringes Treibhausgaspotenzial und keine fluorbasierten Emissionen wie Trifluoressigsäure (TFA), Carbonylfluoride und Fluorwasserstoff. Natürliche Kältemittel verursachen auch in der Produktion und bei der Aufbereitung von Abfällen die geringsten Emissionen (siehe Kapitel 4.2.1, 4.2.2).
- ▶ **Steigerung der Energieeffizienz der Wärmepumpe.** Die Energieeffizienz im Betrieb kann durch technische Verbesserungen optimiert werden. Auch führt der Einsatz natürlicher Kältemittel in dafür optimierten Geräten zu besserer Energieeffizienz (siehe Kapitel 4.2.1).
- ▶ **Verbesserte Reparierbarkeit und Wiederverwendbarkeit** von Teilen oder Materialien der Wärmepumpe. Langlebigkeit reduziert den Energie- und Materialaufwand für Herstellung und Entsorgung der Wärmepumpen und der Komponenten. Können Materialien gut separiert und wiederverwendet werden, fördert das die Kreislaufwirtschaft und reduziert den Rohstoffbedarf (siehe Kapitel 4.2.4).

Bisherige Lebenszyklusanalysen zeigen, dass der Energieverbrauch im Betrieb und die mit der Stromerzeugung verbundenen Treibhausgasemissionen die bedeutendste Umweltwirkung von Wärmepumpen darstellt. Wenn in den kommenden Jahren immer mehr erneuerbare Energien in der Stromerzeugung eingesetzt werden, wird sich die Umweltwirkung der Wärmepumpen kontinuierlich verbessern. Auch wenn der Strom ausschließlich aus erneuerbaren Quellen kommt, werden direkte Emissionen weiterhin signifikante Umweltauswirkungen haben falls fluorierte Kältemittel mit hohem Treibhauspotenzial eingesetzt werden. Auch der Erschöpfung von Rohstoffen und den mit der Entsorgung zusammenhängenden Umweltwirkungen kommt dann eine wesentliche Rolle zu.

Für die Produktgruppe der Wärmepumpen wurden bereits einige relevante Umweltwirkungs- und Lebenszyklusanalysen durchgeführt und für diese Studie betrachtet (Bost et al., 2011; Frischknecht, 1999b; Itard, 2007; Johnson, 2011; Kemna, van Elburg, van den Boorn, & Aarts, 2019; König, 2017). Diese Studien unterscheiden sich jedoch stark vom Fokus, Umfang und auch vom Zeitpunkt der Erstellung her und sind somit nicht direkt vergleichbar. Einige zentrale Ergebnisse können jedoch hervorgehoben werden:

- ▶ Im Allgemeinen bestätigen die betrachteten Umweltwirkungsanalysen, dass neben dem Kältemittel der Energieverbrauch in der Betriebsphase die wichtigste Umweltwirkung darstellt. Auch die Studie zur Weiterentwicklung des Umweltzeichen Blauer Engel für Wärmepumpen aus dem Jahr 2011 reduziert die Untersuchung auf die Umweltkriterien Kältemittel und Energieverbrauch sowie Lärm (Bost et al., 2011)
- ▶ Einige der Studien thematisieren auch das große Potenzial zu einer verbesserten Umweltwirkung von Wärmepumpen bei einem zunehmenden Anteil an erneuerbaren Energien (Bost et al., 2011; Itard, 2007; König, 2017). Obwohl eine Studie von 2007 Wärmepumpen aufgrund ihres Stromverbrauchs im Hinblick auf ihre Umweltwirkung noch als überwiegend negativ bilanzierte, wird das Potenzial hervorgehoben, welches Wärmepumpen bei höheren Anteilen erneuerbarer Energien und höheren Jahresarbeitszahlen haben (Itard, 2007). Beide Aspekte sind heute deutlich verbessert (höherer Anteil erneuerbarer Energien und höhere durchschnittliche Effizienz), wodurch man davon ausgehen kann, dass eine Neuauflage der Studie zu einer deutlich verbesserten Ökobilanz führen würde und die heutigen Annahmen bestätigen würde. Auch Bost et al (2011) sahen Wärmepumpen basierend auf der Zusammensetzung des deutschen Strommarkts noch nicht als die umweltfreundlichste Heizmethode, sahen aber das Potential für die Zukunft, wenn der Anteil erneuerbarer Anlagen steigt.
- ▶ Der positive Effekt einer Umstellung auf natürliche Kältemittel wird deutlich. Der Anteil, den HFKW-Kältemittel zum CO₂-Fußabdruck von Wärmepumpen beitragen, bewertete eine Studie von 2011 aus Großbritannien mit 20 Prozent (Johnson, 2011). Schon 1999 weist die Studie von Frischknecht darauf hin, dass bei der Abwägung der Umweltwirkungen ein natürliches Kältemittel bei gleicher oder besserer Energieeffizienz vorzuziehen ist. Die Studie berichtet bereits über die Ökotoxizität von TFA mit seiner sehr geringen Abbaubarkeit und seiner Akkumulierung in Feuchtgebieten und an den Polen.
- ▶ Die eingebettete Energie, also der Effekt der Nutzung von Materialien wird nur auf zwei bis sechs Prozent geschätzt (Itard, 2007; Johnson, 2011; Kemna et al., 2019).

4.2 Relevante Aspekte der Lebenszyklusanalyse für Wärmepumpen

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die wesentlichen Umweltwirkungen von Hauswärmepumpen. Lebenszyklusanalysen bewerten die Umweltauswirkungen entlang des gesamten Produktlebens. Über den Ansatz „von der Wiege bis zur Bahre“ (im Englischen: „Cradle-to-Grave“) hinaus geht der Cradle-to-Cradle Ansatz. Einbezogen sind unter anderem Rohstoffgewinnung, Materialverbrauch, Produktion, Transport, Nutzung, Reparatur und Wartung, Entsorgung oder Recycling. Es ist möglich damit verbundene vor- und nachgeschaltete Prozesse einzubeziehen wie zum Beispiel Herstellung der Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe. Das Konzept der Life Cycle Climate Performance (LCCP) berücksichtigt die in den Produktmaterialien enthaltene Energie, die Treibhausgasemissionen während der chemischen Herstellung und die Emissionen durch die Entsorgung am Ende des Lebenszyklus.

Mit der Betrachtung der stofflichen Einflüsse der eingesetzten Materialien geht der Ansatz einer Lebenszyklusanalyse über die Berechnung des TEWI und auch des LCCP-Ansatzes hinaus. Der TEWI berücksichtigt die Treibhausgasemissionen im Zusammenhang mit dem Energieverbrauch und dem verwendeten Kältemittel. Das LCCP-Konzept wurde erstmals vom Ausschuss für technologische und wirtschaftliche Untersuchungen (Technology and Economic Assessment Panel; kurz TEAP) des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (United Nations Environmental Programme; UNEP) (TEAP, 1999) vorgeschlagen, um die Klimawirkung der direkten und indirekten Treibhausgasemissionen „von der Wiege bis zu Bahre“ zu berechnen.

Abbildung 30 zeigt die Umweltwirkungen, die bei der Herstellung, dem Betrieb und am Lebensende einer Wärmepumpe entstehen, sowie dem Transport zwischen den Stationen. Auch der Abbau natürlicher Ressourcen, die in den Herstellungsprozess fließen, stellt einen negativen Eingriff in die Umwelt dar. Umweltwirkungen sind neben Treibhausgasemissionen durch Stromverbrauch und Kältemitteln auch weitere Umweltwirkungen auf Wasser, Boden und Luft, die in Kapitel 4.3.3 näher beschrieben werden.

Eine Belastung der Umwelt durch Betriebsgeräusche ist insbesondere bei außen aufgestellten L/L- oder L/W-WP von Bedeutung. Eine ausführliche Diskussion des Themas ist in Kapitel 3.4 zu finden. Da Schallemissionen nicht gemeinsam mit anderen Umweltwirkungen bilanziert werden können und eine Betrachtung nach Herstellung, Betrieb und Lebensende nicht zielführend ist, werden sie in diesem Kapitel nicht weiter beschrieben.

Abbildung 31: Umweltwirkungen im Lebenszyklus einer Wärmepumpe



Quelle: Eigene Darstellung, HEAT GmbH

4.2.1 Treibhausgasemissionen

Treibhausgasemissionen entstehen durch den Energieverbrauch (indirekte Emissionen) 1) bei der Gewinnung von Rohstoffen, bei Herstellung und am Lebensende sowie 2) im Betrieb, und 3) durch den Austritt von Kältemittel in die Atmosphäre (direkte Emissionen).

1. Der Energieverbrauch bei der Gewinnung von Rohstoffen, bei der Herstellung der Komponenten, der Kältemittel sowie der Wärmepumpe und bei Recycling und Entsorgung aller Bestandteile einer Wärmepumpe an deren Lebensende ist zu betrachten. Synthetische Kältemitteln erfordern im Vergleich zu R290 oder R744 (CO₂) einen höheren Energieaufwand bei der Herstellung (siehe auch Abbildung 45). Auch Recycling, Aufarbeitung und Zerstörung von fluorierten Kältemitteln haben einen erhöhten Energieverbrauch. Die vielen verschiedenen Möglichkeiten wurden in dieser Studie nicht mit bilanziert. Beim Recycling werden direkt nach dem Absaugen des Kältemittels aus dem Kältemittelkreislauf vor Ort Verschmutzungen entfernt. Das Kältemittel darf hinterher nur in der gleichen Anlage wiederverwendet werden. Der Energieaufwand für Recycling ist damit gering.

Bei der Aufarbeitung wird das Kältemittel in einen Zustand gebracht, der dem von neuem Kältemittel entspricht. Dieser Prozess ist aufwendig und besteht aus mehreren Schritten, z.B. einer Laboranalyse, Filtrierung und Destillation über einen Kompressor (Stratus Consulting, 2010). Besonders bei Kältemittelmischungen werden spezielle und teure Anlagen eingesetzt, die es an nur wenigen Orten gibt, so dass lange Transportwege notwendig sind.

Die Zerstörung von fluorierten Kältemitteln erfordert sehr hohe Temperaturen von über 1.000 Grad Celsius und ist daher sehr energieintensiv. Dies ist möglich in Müllverbrennungsanlagen für Haus- oder Sondermüll, wobei Drehöfen von Vorteil sind, oder in Zementfabriken (Vehlow & Gloel, 2020). Die Abgasreinigung muss auf sehr hohem Niveau stattfinden und die Entstehung von gefährlichen Produkten, wie zum Beispiel Dioxinen und Furanen muss ständig kontrolliert und verhindert werden. Andere Anlagen, die theoretisch die Möglichkeit zur Zerstörung von fluorierten Kältemitteln haben, kommen selten zum Einsatz, da sie in Anschaffung und/oder Betrieb sehr teuer sind.

Die Möglichkeit der Rückgewinnung von Rohstoffen, wie Salz- und Flusssäure besteht nur bei Anlagen, die Temperaturen über 2.000 Grad Celsius erreichen, wie Porenreaktoren oder Anlagen zur thermischen Spaltung. Somit ist noch mehr Energie notwendig, um diese Anlagen zu betreiben.

2. Der **Energieverbrauch einer Wärmepumpe im Betrieb** verursacht Emissionen durch die Stromerzeugung. Wenn der Betriebsstrom vollständig aus erneuerbaren Energien stammt, sind diese auf die Emissionen in der Vorkette der Anlagen reduziert.
3. **Durch Kältemittel bedingte Emissionen** entstehen, wenn das Kältemittel ungehindert entweicht. Dies kann durch ungewollte Leckagen, Havarien oder unsachgemäße Handhabung bei der Herstellung, im Betrieb, bei Reparatur oder Außerbetriebnahme einer Wärmepumpe passieren, ebenso bei der Herstellung des Kältemittels selbst und bei dessen Rückgewinnung, Recycling, Aufarbeitung oder Zerstörung.

Die direkten Emissionen basieren auf dem jeweiligen Treibhauspotenzial („Global Warming Potential“, kurz GWP) des verwendeten Kältemittels. Dabei wird der Treibhauseffekt eines kg Kältemittel (üblicherweise über 100 Jahre) verglichen mit dem Effekt eines kg CO₂. Die Treibhauspotenziale (GWP) üblicher Kältemittel in Wärmepumpensystemen sind in Tabelle 20 aufgeführt. Diese Werte beziehen sich nur auf den Effekt der Substanz selbst, wenn diese in die Atmosphäre entweicht; sie beziehen jedoch keine Emissionen in der Herstellung mit ein wie z.B. die indirekten Emissionen eines hohen Energieaufwands oder das Anfallen von Beiprodukten mit höherem GWP, die in die Atmosphäre gelangen können. Die Wirkung der Substanzen, zu denen es abgebaut wird, wird ebenfalls außer Acht gelassen. Schon bei der Produktion muss ein erheblicher Effekt hinzugerechnet werden. Ein Bericht der Nichtregierungsorganisation ECOS stellt fest, dass sich beispielsweise bei R1234yf (GWP = 4) ein um 205 bis 393 höherer GWP-Wert ergäbe, wenn die Herstellung mit einberechnet würde (Koronen, Oltersdorf, & Tedesco, 2021).

Beim Abbau in der Atmosphäre zerfallen HFKWs und HFOs hauptsächlich zu Carbonylfluorid (C(O)F₂) und Trifluoracetaldehyd (CF₃C(O)H). Aktuelle Forschungsarbeiten (Campbell, Kable, & Hansen, 2021; Koronen et al., 2021) verweisen darauf, dass letzteres weiter zu R23 abgebaut wird, das einen GWP von 14.800³³ hat. Das weit verbreitete HFO R1234ze wird beispielsweise zu 100 Prozent zu Trifluoracetaldehyd abgebaut, und hiervon wiederum 11 Prozent zu R23. Würde dieser Effekt einbezogen, ergäbe sich für R1234ze nicht das bislang angenommene GWP von 7, sondern 1400 ± 700 (Campbell et al., 2021).

Natürliche Kältemittel haben dagegen ein sehr geringes oder gar kein Treibhausgaspotenzial.

4.2.2 Versauerungspotenzial und Trifluoressigsäure

Das Versauerungspotential (AP, acidification potential) beschreibt, ob ein Schadstoff dazu beiträgt, den pH-Wert eines Gewässers oder des Bodens zu senken. Dies sind Säuren oder Stoffe, die Säuren freisetzen können. Das Versauerungspotential eines Stoffes wird im Vergleich zu Schwefeldioxid angegeben (Jepsen et al, 2015).

Besonders zu beachten ist hier die Bildung von Trifluoressigsäure (TFA) bei der Freisetzung von synthetischen Kältemitteln. TFA ist eine starke Säure, die für einige Organismen giftig ist (Key, Howell, & Criddle, 1997) und zugleich sehr persistent ist, ohne dass ein Abbauprozess bekannt ist (Ellis et al., 2001). TFA kommt natürlicherweise in den Ozeanen in sehr geringen Konzentrationen vor, jedoch nicht in Süßwasser oder anderen terrestrischen Ökosystemen (Christoph, 2002). Durch die Zersetzung fluorhaltiger Kältemittel in der Atmosphäre haben die TFA-Konzentrationen bereits stark zugenommen (Behringer et al., 2021).

Kältemittelquellen von TFA sind vor allem ungesättigte HFKW, die sogenannten HFOs (Hydrofluorolefine) wie zum Beispiel R1234yf, R1234ze(E), R1336mzz(E und Z), aber auch einige HFKW, wie z.B. R134a, R227ea und R143a.

Das Kältemittel R1234yf wird aufgrund seines geringen Treibhauspotenzials vermehrt eingesetzt, entweder als Einzelsubstanz in mobilen Klimaanlage oder als Beigabe zu Kältemittelgemischen um deren Treibhauspotenzial zu mindern. Da R1234yf zu 100 Prozent zu TFA zersetzt wird, wird die Menge an TFA in der Umwelt stark zunehmen.

In einer Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes (Behringer et al., 2021) wurde die Herkunft von TFA aus Kältemitteln und das Verhalten von TFA in der Umwelt untersucht. Für Deutschland wurde berechnet, dass im Jahr 2020 2.000 Tonnen TFA aus Kältemitteln in die Umwelt eingetragen wurden, für das Jahr 2050 könnte dieser Wert gemäß der Prognose auf 6.500 Tonnen pro Jahr ansteigen. Während 2020 noch 50 Prozent des gebildeten TFA aus R134a stammte und nur 10 Prozent aus R1234yf, steigt der Anteil von R1234yf immer mehr an bis auf 70 Prozent im Jahr 2050.

Momentan in Wärmepumpen eingesetzte HFO-Gemische, wie R452B, R454B und R454C enthalten alle R1234yf, und sind damit Vorläufer von TFA. Da TFA im Prinzip nicht abbaubar ist, stellt jeder zusätzliche Eintrag ein Risiko für die Umwelt dar, da nicht absehbar ist, wie akkumulierte TFA in verschiedenen Ökosystemen wirken wird.

Natürliche Kältemittel haben kein oder ein sehr geringes Versauerungspotenzial.

4.2.3 Weitere Umweltwirkungen

Weitere mögliche Umweltwirkungen sind im Folgenden aufgeführt:

- **Eutrophierung:** Ein Eutrophierungspotenzial (EP, eutrophication potential) haben Nährstoffe, wie zum Beispiel Stickstoff- und Phosphorverbindungen, die zur Überdüngung (Eutrophierung) aquatischer und terrestrischer Ökosysteme beitragen können, wenn sie in zu großer Menge eingetragen werden. Die Nährstoffe werden unter Berücksichtigung ihres Eutrophierungspotenzials bilanziert und aggregiert. Das Eutrophierungspotenzial kennzeichnet die Nährstoffwirkung eines Stoffs relativ zu Phosphat. Als Indikator für die Gesamtbelastung werden das aquatische und das terrestrische Eutrophierungspotenzial in Phosphat-Äquivalenten angegeben. Bei Wärmepumpen werden Stoffe mit Eutrophierungspotenzial in der Herstellung von energieintensiven Materialien und beim Recycling, bzw. der thermischen Verwertung frei. Ein geringer Materialeinsatz ist hier von Vorteil. Des Weiteren werden die Stickoxide in der Verbrennung von fossilen Energieträgern

zur Stromerzeugung frei. Je geringer der Energieverbrauch, desto geringer ist daher auch das Eutrophierungspotenzial.

- ▶ **Photochemische Oxidantienbildung:** Bodennahes Ozon, Peroxyacetylnitrat, Wasserstoffperoxid oder freie OH-Radikale sind Luftschadstoffe. Aufgrund ihrer hohen Reaktionsfähigkeit können sie Menschen gesundheitliche Schäden zuführen, z.B. durch Reizung der Augen, Schleimhäute und Lungengewebe (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2020). Auch Pflanzen und Ökosysteme werden geschädigt. Leichtflüchtigen organischen Verbindungen (volatile organic compounds, VOC) wie z.B. Olefinen und Aromaten, aber auch Stickoxiden kommt eine zentrale Rolle zu, da sie Vorläufersubstanzen sind, aus denen Photooxidantien entstehen können (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2020). Als Indikator für die Gesamtbelastung wird das Photooxidantienbildungspotenzial in Äthylen-Äquivalenten angegeben. Das Kältemittel Propan hat ein geringes Photooxidantienbildungspotenzial, Stickoxide entstehen z.B. beim Transport oder in der Energiewirtschaft.
- ▶ **Risiken für den Boden und das Trinkwasser durch Bohrungen für Erdwärmesonden.** Beim Durchbohren der Boden- und Grundwasserschichten besteht das Risiko einer Kontamination, z.B. des sauberen Grundwassers mit oberflächennahen Boden der Schadstoffe enthält. Außerdem können beispielsweise bei fehlerhafter Verfüllung der Bohrlöcher durch Absenkung große Schäden entstehen und zu ineffizientem Betrieb der Anlagen führen. Fehler bei der Bohrung von geothermischen Anlagen, die zu Schäden führten, wurden, wenn auch selten, insbesondere in Baden-Württemberg berichtet (Preiss, 2012; Schieferecke, 2018). Ein Bericht der niederländischen Aufsichtsbehörde für menschliche Umwelt und Verkehr thematisiert ebenfalls, dass Bohrunternehmen durch fehlerhafte Ausführung beim Bau von Bodenenergiesystemen die Umwelt schädigen (ILT, 2021).
- ▶ Verbrauch von **Süßwasserressourcen** (FW, use of net fresh water) bei Entnahme von Frischwasser aus einem Wassereinzugsgebiet.
- ▶ **Gefährlicher Abfall zur Deponie** (HWD, hazardous waste disposed) und **nicht gefährlicher Abfall** (NHWD, non-hazardous waste disposed). Gefährliche Abfälle sind in der Abfallverzeichnisverordnung genannt, alle anderen Abfälle sind nicht gefährlich.
- ▶ **Radioaktiver Abfall** (RWD, radioactive waste disposed) stammt größtenteils aus der Erzeugung von Strom aus Kernenergie.
- ▶ Eine Umweltwirkung geht auch aus vom **Potenzial für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen** (ADPE, abiotic resource depletion potential for elements), z.B. von Metallen, Mineralien, Stein, Kies und Erde. Hierunter fällt auch Uran, das für die Erzeugung von Strom in Kernkraftwerken genutzt wird. Für Wärmepumpen mit fluorierten Kältemitteln ist unter anderem auch der Abbau von Flussspat von Relevanz. Das Potenzial für den abiotischen Abbau fossiler Brennstoffe (ADPF, abiotic resource depletion potential for fossil fuels) bezieht sich auf den Ressourcenverbrauch nicht-erneuerbarer fossiler Brennstoffe.

4.2.4 Materialien und Ressourceneffizienz

Während die Energieeffizienz auf eine Senkung des Energieverbrauchs abzielt, gilt für die Materialeffizienz die Vermeidung von Materialverschnitt und -verlusten, sowie Reduktion des Einsatzes von Betriebs- und Hilfsmittelstoffen. Ressourceneffizienz bezieht sich auf das

Verhältnis eingesetzter natürlicher Ressourcen zum daraus gewonnenen Nutzen. Je weniger Materialien für den entstehenden Nutzen eingesetzt werden, desto besser ist die Ressourceneffizienz. Materialverluste sind besonders ineffizient, wenn das Material bereits eine lange Reise entlang der Wertschöpfungskette hinter sich hat und dementsprechend viel CO₂ aufgewandt wurde, um es zu gewinnen. Diese sogenannten "Hidden Costs" können durch eine genaue Analyse der Materialflüsse aufgedeckt werden, z.B. mithilfe der Materialflussskostenrechnung.

In einer Wärmepumpe kommen Metalle, Kunststoffe und Elektronik zum Einsatz. Außerdem werden Schmieröle und Kältemittel verwendet.

Mit Blick auf die Material- und Ressourceneffizienz gibt es einige Aspekte, die zu betrachten sind:

- ▶ Materialien sollten möglichst leicht voneinander trennbar sein, um sie recyceln und wiederverwenden zu können. Besonders Metalle sind wertvoll und können gut wiederverwendet werden, wenn sie gut separierbar sind.
- ▶ Schmieröle können biologisch abbaubar sein und sollten bei der Entsorgung gut vom Kältemittel getrennt werden können.
- ▶ Natürliche Kältemittel benötigen zu ihrer Herstellung keine kritischen Rohstoffe wie Flussspat. Die Produktion des HFO R1234yf erfordert etwa 40 Prozent mehr Flussspat als die Produktion von R134a (Low, 2010).
- ▶ Bevor eine Wärmepumpe entsorgt wird, sollte sie repariert werden können, so dass eine Lebenszeit von ca. 15 Jahren erreicht werden kann. Mit Blick auf die Langlebigkeit spielen also auch die Verfügbarkeit von Ersatzteilen und Reparaturanleitungen sowie Aktualisierungen und Sicherheitsupdates von Software eine Rolle.

4.3 Lebenszyklusanalyse markttypischer R290-Hauswärmepumpen und Vergleichsfälle

Folgende Vergleichsfälle werden nachfolgend zur Einschätzung der Umwelt- und Klimawirkung von Wärmepumpen betrachtet:

- c) Modellierung von kumuliertem Energieaufwand und Treibhausgasemissionen für am Markt verfügbare Hauswärmepumpen der Bauarten L/W-WP und S/W-WP mit R290 als Kältemittel und markttypischen Kennwerten;
- d) Vergleich mit den effizientesten R290-Hauswärmepumpen am Markt;
- e) Vergleichsfall von marktüblichen Wärmepumpen unter Verwendung des HFKW R32 als Kältemittel;
- a) Analyse weiterer Umweltwirkungen (nach Wärmepumpentyp und separat für Kältemittel).

4.3.1 Methodik

4.3.1.1 Modellannahmen der R290-Hauswärmepumpen

Mit der Zielsetzung einer ganzheitlichen Betrachtung wird die Umweltwirkung repräsentativer Hauswärmepumpen berechnet.

Hierfür wird für zwei Wärmepumpentypen ein markttypischer Referenzfall in einem typischen Leistungsbereich mit Varianten bester Praxis unter Verwendung natürlicher Kältemittel

verglichen, die innovative Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz umsetzen und dadurch zur Optimierung des LCCP-Wertes beitragen. Darüber hinaus wird ein Vergleichsfall dargestellt für Wärmepumpen, die anstatt des natürlichen Kältemittels R290 mit R32 betrieben werden. Die Kenndaten der beiden Wärmepumpentypen, einer außen aufgestellten L/W-WP in Monoblock-Bauweise und einer innen aufgestellten S/W-WP mit Erdreichkollektoren, sind in Tabelle 16 aufgeführt. Als Heizleistung wurden 8 kW ausgewählt (siehe Kapitel 4.3.1.4), die angenommene Lebensdauer beträgt 15 Jahre. Die Werte für JAZ bei 35°C sowie 55°C Vorlauftemperatur für mittleres Klima stellen einen Durchschnitt von derzeit in Deutschland erhältlichen R290-Wärmepumpen dar. Für L/W-WP wurden hierbei knapp über 40 Modelle ausgewertet, für S/W-WP nur sieben, da viel weniger Modelle verfügbar sind (siehe Anhang B). Die Kältemittelmenge wurde nur für Modelle mit einer Heizleistung zwischen 7 und 9 kW erhoben. Die zugehörigen Kenndaten wurden durch Produktinformationen sowie Informationsaustausch im Rahmen von Herstellergesprächen bezogen. Material für Elektronikbauteile und Isolierung wird aus Gründen der Vereinfachung nicht separat betrachtet.

Tabelle 21: Referenzfall der R290-Hauswärmepumpen für LCCP-Berechnung

Wärmepumpen-Typ	L/W-WP Monoblock außen	S/W-WP innen
Heizleistung nominal ³⁴	8 kW	8 kW
Lebensdauer (Gschrey et al., 2020)	15 Jahre	15 Jahre
JAZ (35°C, mittleres Klima) ³⁵	4,83	5,45
JAZ (55°C, mittleres Klima) ³⁶	3,68	3,78
Kältemittel	R290	R290
Kältemittel-Füllmenge	1,50 kg	0,70 kg
Gesamtgewicht der WP-Anlage	280 kg	390 kg
davon Wärmequellenkreis	0 kg	250 kg
davon externe Verrohrung und Hydraulikmodul	120 kg (77% Stahl, 23% Kupfer)	0 kg
davon Wärmepumpe	160 kg	140 kg
Wärmepumpe: Gewichtsanteile pro Material	Stahl / Kupfer / Aluminium / Kunststoff 59% / 15% / 6% / 20%	Stahl / Kupfer / Aluminium / Kunststoff 80% / 5% / 0% / 15%

Quelle: Salzburger Landesregierung (2021), sowie ausgewählte Datenblätter und Herstellerangaben der Firma Hautech (sofern nicht separat gekennzeichnet)

Die oben genannten Jahresarbeitszahlen (JAZ) beruhen auf den genannten Vorlauftemperaturen von 35°C bzw. 55°C, welche als Annahmen der Temperaturniveaus zugrunde gelegt werden, bei

34 Bei A2/W35 bzw. B0/W35 gemäß Testbedingungen der EN 14511

35 gemäß Testbedingungen der EN 14511

36 gemäß Testbedingungen der EN 14511

denen die Wärmepumpe in den Heizkreis bzw. den Warmwasserspeicher einspeist, bei mittlerem (gemäßigtem) Klima nach EN 14511³⁷.

Die Betrachtung von Gewichtsanteilen ist unterteilt in den Wärmequellekreis (nur S/W-WP), externe Verrohrung und Hydraulikmodul (nur L/W-WP) und schließlich die Wärmepumpe selbst. Als wesentliche Materialien werden Stahl, Kupfer, Aluminium und Kunststoff betrachtet.

Daten für den Energieaufwand im Rahmen der Herstellung der betrachteten Materialien wurden soweit möglich aus der Datenbank Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme (ProBas)³⁸ des Umweltbundesamts bezogen (UBA, 2021b). Als Ergänzung wurden Datensätze von Ökobaumat³⁹ verwendet, die zu Herstellung, Transport sowie Abfallbehandlung, -beseitigung und Recycling Angaben zu erneuerbarer und nicht-erneuerbarer Primärenergie sowie sämtlichen zu betrachtenden Umweltwirkungen enthalten (BMI, 2021). In Tabelle 17 ist der Kumulierte Energieaufwand (KEA) zur Herstellung der eingesetzten Materialien dargestellt, wobei Prozesswärme je nach Material von verschiedenen Energieträgern bereitgestellt wird (Details dazu siehe Tabelle 17). In der Tabelle sind auch die in der LCCP-Berechnung betrachteten Kältemittel R290 und R32 (Vergleichsfall) mit aufgeführt.

Tabelle 22: Annahmen des Energieaufwands im Herstellungsprozess je Einheit in kg

Material	Stahlblech	Kupfer	Aluminium	Kunststoff	R290	R32
Datengrundlage in ProBas	MetallStahl-Blech-DE-2020	MetallKupfer-DE-primär-2020	Metall\Aluminium-DE-2020	ABS	Chem- OrgR290 (Propan)- DE-2000	Frischknecht, 1999 ⁴⁰
Stromverbrauch (inkl. Vorkette), in TJ	1,30E-06	1,10E-05	5,00E-05	6,30E-06	1,31E-07	2,00E-06
Ölverbrauch, in TJ	3,36E-07	-	-	-	4,64E-05	
Gasverbrauch, in TJ	-	6,30E-06	-	-		1,00E-05
Prozesswärme, in TJ	2,33E-06	-	-	5,80E-06		

Quelle: ProBas Datenbank (UBA, 2021b); (Frischknecht, 1999a)

Nachfolgend werden die Grundlagen der Berechnung der Umweltwirkungen durch THG-Emissionen beschrieben.

³⁷ Diese Bedingungen herrschen in den nördlichen und westlichen Landesteilen Deutschlands vor. Im Süden und Osten dominiert laut Normbedingungen kaltes Klima.

³⁸ Prozesskategorien der ProBas Datenbank: Energie, Materialien & Produkte, Transport, Entsorgung (UBA, 2021b)

³⁹ ÖKOBAUDAT-Datensätze (aktuelle Version: 2021-I vom 04.01.2021) sind konform zur DIN EN 15804 und wird durch das Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) unterhalten. Ökobaumat ist zur Benutzung der Ökobilanzierung von Gebäuden vorgesehen, in 8.1.01 sind Wärmeerzeuger hinterlegt, darunter elektrisch angetriebene L/W- und S/W-WP verschiedener Leistungsgrößen. Gleichermaßen sind unter 8.2.04 Daten zu Herstellung und Recycling von Kältemitteln hinterlegt, darunter R290 und R32 (BMI, 2021)

⁴⁰ Anhang Kältemittel LCA (Frischknecht, 1999a)

4.3.1.2 Emissionen basierend auf Energieaufwand in der Herstellung

Emissionen durch Energieaufwand (indirekte Emissionen) im Herstellungsprozess werden auf Basis der in Tabelle 17 aufgeführten Daten hergeleitet. Hierfür verwendete Emissionsfaktoren sind wie folgt und werden auch für die Herstellung von Kältemittel verwendet.

Tabelle 23: Emissionsfaktoren verschiedener Energieträger (CO₂-Äq. inklusive Vorkette)

Energieträger	Emissionsfaktor	Physikalische Einheit	Verwendung (Material, bzw. Kältemittel)
Strom	0,430	kg /kWh elektrisch	alle
Fossile Brennstoffe			
Erdgas	0,241	kg /kWh	Kupfer, Prozesswärme Stahl, Prozesswärme Kunststoff (66%); Kältemittel R32
Erdöl (Heizöl) leicht	0,313	kg /TJ	Stahl, Prozesswärme Aluminium, Prozesswärme Kunststoff (16%); Kältemittel R290
Steinkohle	0,429	kg /kWh	Prozesswärme Kunststoff (18%)

Quelle: Lauf et al. (2021)

Für Strom wurde nach Icha (2021) ein Anteil von 60 Prozent nicht-erneuerbare und 40 Prozent erneuerbare Energieträger angenommen.

Die Berechnung des Energieaufwands erfolgt aus dem Produkt aus Gesamtgewicht, Gewichtsanteil des jeweiligen Materials, jeweiligem Energieaufwand pro Einheit (in kg), und für die Berechnung der THG-Emissionen zudem multipliziert mit dem zugehörigen Emissionsfaktor. Damit ergibt sich folgende Gleichung.

$$\text{indirekte Emissionen (Herstellung)} = \text{Gesamtgewicht} \times \text{Gewichtsanteil} \times \text{Energieaufwand je Einheit} \times \text{EF}$$

EF: Emissionsfaktor gemäß Tabelle 23

Durch Aufsummierung des Energieaufwands aller betrachteten Materialien ergibt sich der gesamte Energieaufwand für den Herstellungsprozess. Um dem Energieaufwand im Werk für die Endverarbeitung der Wärmepumpen Rechnung zu tragen, wurde auf die Gesamtsumme ein Zusatzfaktor von 5 Prozent aufgeschlagen.

4.3.1.3 Direkte Emissionen durch Kältemittel

Direkte Emissionen entstehen durch Entweichen von Kältemittel in die Atmosphäre. Diese werden durch das Produkt aus Kältemittelfüllmenge, Treibhauspotenzial (GWP) des jeweiligen Kältemittels und Leckagerate hergeleitet. Die angenommenen Leckageraten wie folgt beziehen sich auf die ursprüngliche Kältemittelfüllmenge.

$$\text{direkte Emissionen} = \text{Kältemittelfüllmenge} \times \text{GWP} \times \text{Leckagerate}$$

Leckagerate bei Herstellung und Installation: 0,2 Prozent pro Jahr (nach IPCC/SCROP Report, unteres Ende: Bjønness, Gustafsson, Ishikawa, & Maione, 2019)

Leckagerate im Betrieb: 2,5 Prozent pro Jahr (Heubes et al., 2014)

Leckagerate am Ende des Lebenszyklus: 35,2 Prozent pro Jahr (Ökobaumat, 2019)

4.3.1.4 Indirekte Emissionen durch Energieverbrauch im Betrieb

Indirekte Emissionen (basierend auf Energieverbrauch) im Betrieb ergeben sich aus dem durch die Wärmepumpe abgedeckten Wärmebedarf dividiert durch die Jahresarbeitszahl (JAZ) und multipliziert mit dem Emissionsfaktor (EF) des Stromnetzes.

$$\text{indirekte Emissionen (Betrieb)} = \text{Jährlicher Wärmebedarf} / \text{JAZ} \times \text{EF}$$

EF: 0,430 kg CO₂ pro kWh elektrisch (Lauf et al., 2021)

Nicht in allen Gebäuden können Wärmepumpen momentan wirtschaftlich eingesetzt werden (siehe Kapitel 2.3.2). In nicht oder nur wenig sanierten Gebäuden ist dies nicht der Fall. Daher wird für die folgende Betrachtung nicht ein Durchschnittsgebäude für Deutschland angenommen, sondern ein energetisch gut modernisiertes Einfamilienhaus, das um das Jahr 2000 errichtet wurde. Gemäß der Publikation des Spitzenverbands der Gebäudetechnik (VdZ) „Fachregel Optimierung von Heizungsanlagen im Bestand (VdZ - Forum für Energieeffizienz, 2016), die auf dem Nationalen Anhang der DIN EN 15378 „Heizungssysteme in Gebäuden – Inspektion von Kesseln und Heizungssystemen“ basiert, kann für ein solches Gebäude eine spezifische Heizlast zwischen 45 und 67 W/m² angenommen werden bei einer Nutzfläche von 120 m². Hier wird eine Heizlast von 50 W/m² angenommen. Die Heizlast des Gebäudes wird daraus grob überschlagen, indem ein Aufschlag für Warmwasser von 250 W/Person bei einem 3 Personenhaushalt sowie ein Aufschlag für Sperrzeiten im Wärmepumpenstromtarif zwischen 1.1 und 1.3 angenommen werden. Hieraus ergibt sich eine Heizlast von ca. 8 Kilowatt.

Der Endenergie- und der Primärenergiebedarf wurden daraus abgeleitet (siehe Tabelle 19). Mit einem Primärenergiebedarf von ca. 65 kWh/m²a liegt unser Beispiel damit in der Gebäudeklasse B laut Energieausweis. Dies könnte auf ein energetisch gut modernisiertes Einfamilienhaus oder einen Einfamilienhaus-Neubau zutreffen.

Für die Berechnung des Stromverbrauchs der Wärmepumpen wurden als Jahresarbeitszahlen (JAZ) zugrunde gelegt: 35°C Vorlauftemperatur für Raumbeheizung (typisch für Flächenheizungssysteme) und 55°C für Brauchwarmwasser (Kombination aus regelmäßiger Erwärmung der Warmwasserspeicher zur Vermeidung von Legionellenbildung > 60°C und Bedarfstemperaturen im normalen Gebrauch bei üblicherweise < 50°C). Bei einem modernisierten Haus ohne Flächenheizung ist eine Vorlauftemperatur von mindestens 45°C notwendig, dieser Fall wurde hier nicht mitberücksichtigt.

Tabelle 24: Annahmen zur Berechnung des jährlichen Wärmebedarfs

Parameter	Wert	Wert Raumbeheizung	Wert Brauchwarmwasser
Heizleistung	8 kW		
Vollaststunden ⁴¹	2000 h		
Beheizte Gebäudefläche	120 m ²		
Heizenergiebedarf	16.000 kWh/a	11.748 kWh/a	4.252 kWh/a ⁴²
Zugrunde gelegte Leistungszahl L/W-WP		JAZ (35°C, mittleres Klima)	JAZ (55°C, mittleres Klima) 3,68

⁴¹ Annahme für mittleres Klima

⁴² Bei einem täglichen Bedarf von 11,65 kWh an 365 Tagen im Jahr, basierend auf Profil L der EU-Verordnung 811/2013 (EU, 2013a)

Parameter	Wert	Wert Raumbeheizung	Wert Brauchwarmwasser
Zugrunde gelegte Leistungszahl S/W-WP		4,83 JAZ (35°C, mittleres Klima) 5,45	JAZ (55°C, mittleres Klima) 3,78
Netzbezogener Primärenergiefaktor Strom⁴³	1,8		
Spezifischer jährlicher Primärenergiebedarf L/W-WP	64,65 kWh/m ² a	43,83 kWh/m ² a	20,83 kWh/m ² a
Spezifischer jährlicher Primärenergiebedarf S/W-WP	59,05 kWh/m ² a	38,80 kWh/m ² a	20,25 kWh/m ² a

Quelle: Eigene Darstellung, HEAT GmbH

4.3.1.5 Transport, Recycling, Abfallbehandlung und Entsorgung

Die Annahmen zu Energieaufwand und THG-Emissionen bei Transport, Recycling, Abfallbehandlung und Entsorgung basieren auf den Datensätzen von Ökobaudat für L/W- und S/W-WP. Die in der Ökobaudat-Datenbank angegebenen Daten für beide Wärmepumpentypen wurden linear auf 8 Kilowatt Heizleistung skaliert (siehe nachfolgende Tabelle). Die Angaben zu Energieaufwand und THG-Emissionen bei Transport werden unter Herstellung mit eingerechnet.

Gleichermaßen wurden Daten zu Energieaufwand und damit einhergehenden THG-Emissionen für Recycling der betrachteten Kältemittel R290 und R32 (Vergleichsfall) basierend auf Ökobaudat mit einbezogen.

⁴³ Gebäudeenergiegesetz (GEG) 2020, Anlage 4

Tabelle 25: Energieaufwand und THG-Emissionen für Transport, Recycling, Abfallbehandlung und Entsorgung

Produkt	Kategorie	Transport	Abfallbehandlung und Entsorgung	Recycling
L/W-WP, 8 kW	Nicht-erneuerbare Primärenergie, in MJ	13,8	12,5	1.833
	Erneuerbare Primärenergie, in MJ	3,4	1,8	221
	THG-Emissionen, in kg CO ₂ -Äquivalent	1,0	27,5	193
S/W-WP, 8 kW	Nicht-erneuerbare Primärenergie, in MJ	13,3	2,5	1.004
	Erneuerbare Primärenergie, in MJ	2,8	0,5	44,2
	THG-Emissionen, in kg CO ₂ -Äquivalent	1,0	3,5	125
R290, 1 kg	Nicht-erneuerbare Primärenergie, in MJ			52,9
	Erneuerbare Primärenergie, in MJ			52,7
	THG-Emissionen, in kg CO ₂ -Äquivalent			0,51
R32, 1 kg	Nicht-erneuerbare Primärenergie, in MJ			111
	Erneuerbare Primärenergie, in MJ			96,1
	THG-Emissionen, in kg CO ₂ -Äquivalent			4,8

Quelle: Ökobaudat Datenbank (BMI, 2021)

4.3.1.6 Modellerte Vergleichsfälle

Bei der L/W-WP im Hocheffizienzbereich ändern sich bei um 10 Kilogramm reduziertem (L/W-WP) bzw. gleichbleibendem (S/W-WP) Gesamtgewicht der Wärmepumpe die Gewichtsanteile der verwendeten Materialien. Beide Fälle basieren auf real existierenden Modellen und stellen die zum Zeitpunkt der Berechnung effizientesten Modelle am Markt dar. Aufgrund fehlender Datengrundlage werden für die hocheffiziente S/W-WP die gleichen Gewichtsanteile wie im Referenzfall angenommen. Aufgrund von Außenaufstellung wird für die hocheffiziente S/W-WP zusätzlich ein Hydraulikmodul mit weiterer Verrohrung berücksichtigt. Die hocheffiziente und außen aufgestellte S/W-WP verwendet eine deutlich höhere Kältemittelfüllmenge von 2,9 Kilogramm im Vergleich zum Referenzfall. Die hocheffiziente L/W-WP kommt hingegen mit einer Kältemittelfüllmenge von 1,2 Kilogramm aus und liegt damit noch unter dem im Referenzfall verwendeten, typischen Wert von 1,5 Kilogramm.

Die nachfolgenden Tabellen nehmen die in den betrachteten Fallbeispielen geänderten Parameter in den Fokus. Diejenigen Parameter, die sich im Vergleich zum Referenzfall (Tabelle 21) nicht ändern, werden nicht nochmal dargestellt.

Tabelle 26: Variante der LCCP-Berechnung für hocheffiziente R290-Hauswärmepumpen

Wärmepumpen-Typ	L/W-WP Monoblock außen	S/W-WP innen
JAZ (35°C, mittleres Klima)	5,73	6,67
JAZ (55°C, mittleres Klima)	4,55	4,61
Kältemittel	R290	R290
Kältemittel-Füllmenge	1,20 kg	2,90 kg (Wärmepumpe wird außen aufgestellt)
Gesamtgewicht der WP-Anlage	270 kg	480 kg
Gewicht externe Verrohrung und Hydraulikmodul	wie Referenzfall	90 kg (77% Stahl, 23% Kupfer)
Gewicht der Wärmepumpe	150 kg	wie Referenzfall
Wärmepumpe: Gewichtanteile pro Material	Stahl / Kupfer / Aluminium / Kunststoff 21% / 16% / 52% / 11%	wie Referenzfall

Quelle: Herstellerangaben und Datenblätter

Für den Vergleichsfall der mit R32 betriebenen Hauswärmepumpen wurde das gleiche Gesamtgewicht der Wärmepumpen und externer Bauteile wie im Referenzfall mit R290 angenommen, ebenso wie die Gewichtsanteile einzelner Materialien (siehe Tabelle 21). Aufgrund der Verwendung des HFKW-Kältemittels R32 steigt im Vergleich zum Referenzfall mit R290 die Kältemittelfüllmenge bei niedrigerer Energieeffizienz.

Tabelle 27: Variante der LCCP-Berechnung für Vergleichsfall mit R32

Wärmepumpen-Typ	L/W-WP Monoblock außen	S/W-WP innen
JAZ (35°C, mittleres Klima)	4,70	5,19
JAZ (55°C, mittleres Klima)	3,58	3,68
Kältemittel	R32	R32
Kältemittel-Füllmenge	2,04 kg	0,95 kg

Quelle: Salzburger Landesregierung (2021), sowie Herstellerangaben und Datenblätter der Firmen Daikin und Mitsubishi

4.3.2 Quantifizierung von Primärenergie und THG-Emissionen

Nachfolgend werden die THG-Emissionen und der kumulierte Energieaufwand (KEA) über den gesamten Lebenszyklus der Wärmepumpen dargestellt. Die Analyse basiert auf den zuvor beschriebenen Wärmepumpenmodellen mit zugehörigen Annahmen und den daraus abgeleiteten Referenz- und Vergleichsfällen, modelliert für eine L/W-WP und eine S/W-WP mit jeweils 8 kW nominaler Heizleistung. Der kumulierte Energieaufwand ist in der Betrachtung unterteilt in nicht-erneuerbare und erneuerbare Anteile.

4.3.2.1 Referenzfall: R290-Hauswärmepumpen mit markttypischen Kennwerten

Nachfolgend werden die prozentualen Anteile der einzelnen Produktphasen beider betrachteten Wärmepumpenbauarten und des Kältemittels am gesamten Lebenszyklus für den Referenzfall einer markttypischen R290-Hauswärmepumpe dargestellt. Wie aus Abbildung 32 ersichtlich wird, ist die Betriebsphase der Wärmepumpe für den überwiegenden Teil der THG-Emissionen wie auch des KEA verantwortlich.

Bei der L/W-WP trägt die Betriebsphase zu 97 Prozent zum gesamten nicht-erneuerbaren KEA, zu 99 Prozent zum erneuerbaren KEA und zu 98 Prozent zu den gesamten THG-Emissionen im Laufe des Lebenszyklus der Wärmepumpe bei. Die Produktion und das Lebenszyklusende tragen jeweils circa ein Prozent zu den THG-Emissionen bei.

Bei der Sole/Wasser-WP trägt die Betriebsphase zu 96 Prozent zum gesamten nicht-erneuerbaren KEA, zu 99 Prozent zum erneuerbaren KEA und zu unter 98 Prozent zu den gesamten THG-Emissionen im Laufe des Lebenszyklus der Wärmepumpe bei. Die Produktion trägt zu fast zwei Prozent und das Lebenszyklusende zu 0,6 Prozent zu den THG-Emissionen bei.

THG-Emissionen und KEA in allen Lebenszyklusphasen des Kältemittels R290 sind marginal.

Abbildung 32: THG-Emissionen und kumulierter Energieaufwand (KEA) der L/W- und S/W-WP (R290 Referenzfall) nach Anteilen am Lebenszyklus



Die absoluten Werte der THG-Emissionen und des kumulierten Energieaufwands (KEA) in beiden Kategorien sind in Tabelle 28 für beide Wärmepumpentypen dargestellt. Da in der Betriebsphase nur Strom zum KEA beiträgt, liegt hier der Anteil von erneuerbarem KEA bei 40

Prozent. Da die Betriebsphase in den Umweltauswirkungen sehr dominant ist, liegt der Anteil des erneuerbaren KEAs insgesamt bei 39 Prozent. Im Herstellungsprozess (20 bis 24 Prozent) und am Lebenszyklusende (4 bis 11 Prozent) liegt der Anteil des erneuerbaren KEA am gesamten KEA jeweils deutlich darunter, wobei die L/W-WP Anteile im oberen Bereich und die S/W-WP Anteile im unteren Bereich aufweist. Die Anteile des erneuerbaren KEA an Kältemittelherstellung (0,1 Prozent) und -recycling (0,5 Prozent) sind jeweils marginal.

Tabelle 28: THG-Emissionen, Kumulierter Energieaufwand nicht-erneuerbar sowie erneuerbar für L/W- und S/W-WP (R290 Referenzfall) nach Lebenszyklusphase einschließlich des Kältemittels

Absolute Zahlen in der oberen Reihe, darunter in Klammern der jeweilige Anteil am Gesamtwert in Prozent.

Wärmepumpentyp	L/W			Sole/Wasser		
Kategorie	THG, in kg CO ₂ Äquiv.	KEA – Nicht erneuerbar, in MJ	KEA Erneuerbar, in MJ	THG, in kg CO ₂ Äquiv.	KEA – Nicht erneuerbar, in MJ	KEA Erneuerbar, in MJ
Produktion: Wärmepumpe ⁴⁴	267 (1,13)	2.056 (1,71)	632 (0,81)	399 (1,84)	3.239 (2,93)	813 (1,13)
Produktion: Kältemittel	5,13 (0,02)	69,7 (0,06)	0,08 (0,00)	2,40 (0,01)	32,5 (0,03)	0,04 (0,00)
Betrieb: Wärmepumpe	23.167 (97,9)	116.376 (96,6)	77.584 (98,9)	21.169 (97,5)	106.336 (96,1)	70.891 (98,8)
Betrieb: Kältemittel	1,69 (0,01)			0,79 (0,00)		
Lebenszyklusende: Wärmepumpe	221 (0,93)	1.845 (1,53)	222 (0,28)	129 (0,59)	1.007 (0,91)	45 (0,06)
Lebenszyklusende: Kältemittel	2,34 (0,01)	79,0 (0,07)	0,40 (0,00)	1,09 (0,01)	36,9 (0,03)	0,19 (0,00)
Gesamt	23.664	120.426	78.439	21.701	110.651	71.749

Quelle: Eigene Darstellung, HEAT GmbH

Szenario einer CO₂-ärmeren Stromerzeugung

Durch Absenkung des Emissionsfaktors der Stromerzeugung auf ein Drittel des derzeitigen Werts auf 0,143 kg CO₂ pro kWh elektrisch⁴⁵ könnten die THG-Emissionen aufgrund des hohen Anteils des Wärmepumpenbetriebs auch für den gesamten Lebenszyklus um bis zu 66 Prozent gesenkt werden. Dadurch ergeben sich THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus von circa 8.000 kg CO₂-Äquivalent für die L/W-WP und 7.370 kg CO₂-Äquivalent für die S/W-WP.

Die Anteile der Wärmepumpenherstellung und des Lebenszyklusendes der Wärmepumpe an den gesamten THG-Emissionen im Laufe des Lebenszyklus würden dadurch um 50 bis 100 Prozent ansteigen, in der Gesamtbilanz aber weiterhin auf niedrigem Niveau verbleiben. Bei CO₂-ärmerer Stromerzeugung beläuft sich der Anteil der Produktion der L/W-WP an den

⁴⁴ Inkl. Transport

⁴⁵ entsprechend einer für 2030 getroffenen Annahme (Miara, 2021; Prognos et al., 2020)

gesamten THG-Emissionen auf 1,8 Prozent, für die S/W-WP auf 3,2 Prozent. Das Lebenszyklusende der Wärmepumpen nimmt in diesem Szenario Anteile von 1,8 für L/W- bzw. 1,2 Prozent für die S/W-WP ein.

4.3.2.2 Fallbeispiel: hocheffiziente R290-Hauswärmepumpen

Nachfolgend werden die prozentualen Anteile der einzelnen Produktphasen der Wärmepumpe und des Kältemittels am gesamten Lebenszyklus für den Vergleichsfall einer hocheffizienten R290-Hauswärmepumpe beider Bauarten (L/W und S/W) dargestellt (Abbildung 33). Aufgrund der Effizienzsteigerung im Betrieb, im Falle der L/W-WP dazu auch direkt durch die Materialauswahl mit erhöhtem Aluminium-Anteil, steigt die anteilige Bedeutung der Herstellungsphase sowie des Lebenszyklusendes.

Für die L/W-WP trägt die Betriebsphase circa 92 Prozent zum gesamten nicht-erneuerbaren kumulierten Energieaufwand (KEA) und 96 Prozent zum gesamten erneuerbaren KEA bei, sowie zu rund 94 Prozent der gesamten THG-Emissionen im Laufe des Lebenszyklus bei. Die Produktion und das Lebenszyklusende tragen jeweils circa drei Prozent zu den THG-Emissionen bei.

Für die S/W-WP trägt die Betriebsphase circa 95 Prozent zum gesamten nicht-erneuerbaren kumulierten Energieaufwand (KEA) und 98 Prozent zum gesamten erneuerbaren KEA bei, sowie zu rund 97 Prozent der gesamten THG-Emissionen. Die Produktion trägt zu zwei Prozent und das Lebenszyklusende zu einem Prozent zu den THG-Emissionen bei.

THG-Emissionen und KEA in allen Lebenszyklusphasen des Kältemittels R290 sind marginal.

Abbildung 33: THG-Emissionen und KEA der L/W- und S/W-WP (Vgl. R290 hocheffizient) nach Anteilen am Lebenszyklus



Quelle: Eigene Darstellung, HEAT GmbH

Die absoluten Werte der THG-Emissionen und des KEA in beiden Kategorien sind in Tabelle 29 für beide Wärmepumpentypen dargestellt.

Tabelle 29: THG-Emissionen, Kumulierter Energieaufwand nicht-erneuerbar sowie erneuerbar für L/W- und S/W-WP (Vergleichsfall für hocheffiziente R290-Wärmepumpen) nach Lebenszyklusphase einschließlich des Kältemittels

Wärmepumpentyp	L/W			S/W		
Kategorie	THG, in kg CO ₂ Äquiv.	KEA – Nicht erneuerbar, in MJ	KEA Erneuerbar, in MJ	THG, in kg CO ₂ Äquiv.	KEA – Nicht erneuerbar, in MJ	KEA Erneuerbar, in MJ
Produktion: Wärmepumpe ⁴⁶	677	4.102	1.993	439	3.442	948
Produktion: Kältemittel	4,11	55,8	0,06	9,93	135	0,15

46 Inkl. Transport

Wärmepumpentyp	L/W			S/W		
Betrieb: Wärmepumpe	19.263	96.765	64.510	17.315	86.979	57.986
Betrieb: Kältemittel	1,35			3,26		
Lebenszyklusende: Wärmepumpe	519	3.682	700	141	1.070	52,1
Lebenszyklusende: Kältemittel	2,03	63,2	0,32	3,42	153	0,78
Gesamt	20.467	104.668	67.203	17.912	91.777	58.987

Quelle: Eigene Darstellung, HEAT GmbH

4.3.2.3 Fallbeispiel: Hauswärmepumpen mit Kältemittel R32

Nachfolgend werden die prozentualen Anteile der einzelnen Produktphasen der Wärmepumpe und des Kältemittels am gesamten Lebenszyklus für den Vergleichsfall einer mit dem HFKW-Kältemittel R32 betriebenen Hauswärmepumpe beider Bauarten (L/W und S/W) dargestellt (Abbildung 34).

Aufgrund des höheren Treibhauspotenzials von R32 (nach F-Gas-Verordnung (EU, 2014d) 675, im Vergleich zu 3 für R290), steigt im Vergleich zum R290-Referenzfall für die THG-Emissionen die anteilige Bedeutung des Kältemittels im Betrieb und am Lebenszyklusende. Aufgrund der höheren Füllmenge macht sich die Auswirkung der Kältemittelwahl insbesondere bei der L/W-WP bemerkbar, durch Anteile von jeweils circa zwei Prozent im Betrieb und am Lebenszyklusende an den gesamten THG-Emissionen des Lebenszyklus. Für die S/W-WP liegen die Anteile jeweils bei circa einem Prozent.

Für beide betrachteten Wärmepumpenbauarten trägt die Betriebsphase 96 bis 97 Prozent zum gesamten nicht-erneuerbaren kumulierten Energieaufwand (KEA) und 99 Prozent zum gesamten erneuerbaren KEA im Laufe des Lebenszyklus der Wärmepumpen bei. Bezogen auf die gesamten THG-Emissionen des Lebenszyklus liegt der Anteil des Energieverbrauchs für den Betrieb der L/W-WP bei 94 Prozent sowie bei 96 Prozent für die S/W-WP.

Für die L/W-WP liegen die Anteile des Produktionsprozesses der Wärmepumpe am gesamten Lebenszyklus bei zwei Prozent für den nicht-erneuerbaren KEA, für den erneuerbaren KEA und die THG-Emissionen bei jeweils circa einem Prozent. Bei der S/W-WP betragen die Anteile der Wärmepumpenherstellung drei Prozent für den nicht-erneuerbaren KEA, ein Prozent für den erneuerbaren KEA und zwei Prozent für die THG-Emissionen.

Abbildung 34: THG-Emissionen und KEA der L/W- und S/W-WP (R32-Vergleichsfall) nach Anteilen am Lebenszyklus



Quelle: Eigene Darstellung, HEAT GmbH

Die absoluten Werte der THG-Emissionen und des KEA in beiden Kategorien sind in Tabelle 30 für beide Wärmepumpentypen dargestellt.

Tabelle 30: THG-Emissionen, Kumulierter Energieaufwand nicht-erneuerbar sowie erneuerbar für L/W- und S/W-WP (Vergleichsfall für R32-Wärmepumpen) nach Lebenszyklusphase einschließlich des Kältemittels

Wärmepumpentyp	Luft/Wasser			Sole/Wasser		
Kategorie	THG, in kg CO ₂ Äquiv.	KEA – Nicht erneuerbar, in MJ	KEA Erneuerbar, in MJ	THG, in kg CO ₂ Äquiv.	KEA – Nicht erneuerbar, in MJ	KEA Erneuerbar, in MJ
Produktion: Wärmepumpe ⁴⁷	267	2.056	632	399	3.239	813
Produktion: Kältemittel	9,72	94,8	0,11	4,54	44,2	0,05
Betrieb: Wärmepumpe	23.783	119.466	79.644	22.060	110.812	73.875

47 Inkl. Transport

Wärmepumpentyp	Luft/Wasser			Sole/Wasser		
Betrieb: Kältemittel	516			241		
Lebenszyklusende: Wärmepumpe	221	1.846	222	129	1.007	44,7
Lebenszyklusende: Kältemittel	485	79,0	0,40	227	36,9	0,19
Gesamt	25.282	123.541	80.499	23.060	115.139	74.733

Quelle: Eigene Darstellung, HEAT GmbH

4.3.2.4 Gegenüberstellung des R290-Referenzfalls und der weiteren Fallbeispiele

Nachfolgend wird der R290-Referenzfall mit den Fallbeispielen einer hocheffizienten Wärmepumpe mit R290 und einer marktüblichen Wärmepumpe mit R32 direkt gegenübergestellt, jeweils für die Bauarten L/W- (Abbildung 35) und S/W-WP (Abbildung 36).

Bedingt durch die veränderte Materialzusammensetzung mit sehr hohem Anteil von Aluminium zur Vergrößerung der Wärmeübertragungsfläche weist die hocheffiziente L/W-WP mit R290 deutlich höhere THG-Emissionen in der Herstellungsphase wie auch am Lebenszyklusende der Wärmepumpe auf (jeweils circa das 2,5-fache). Aufgrund der deutlichen Energieeffizienzsteigerung im Vergleich zum Referenzfall wird dies aber im Laufe der Betriebsphase mehr als kompensiert, sodass die hocheffiziente L/W-WP unter der angenommenen Lebensdauer von 15 Jahren insgesamt circa 14 Prozent der THG-Emissionen einspart.

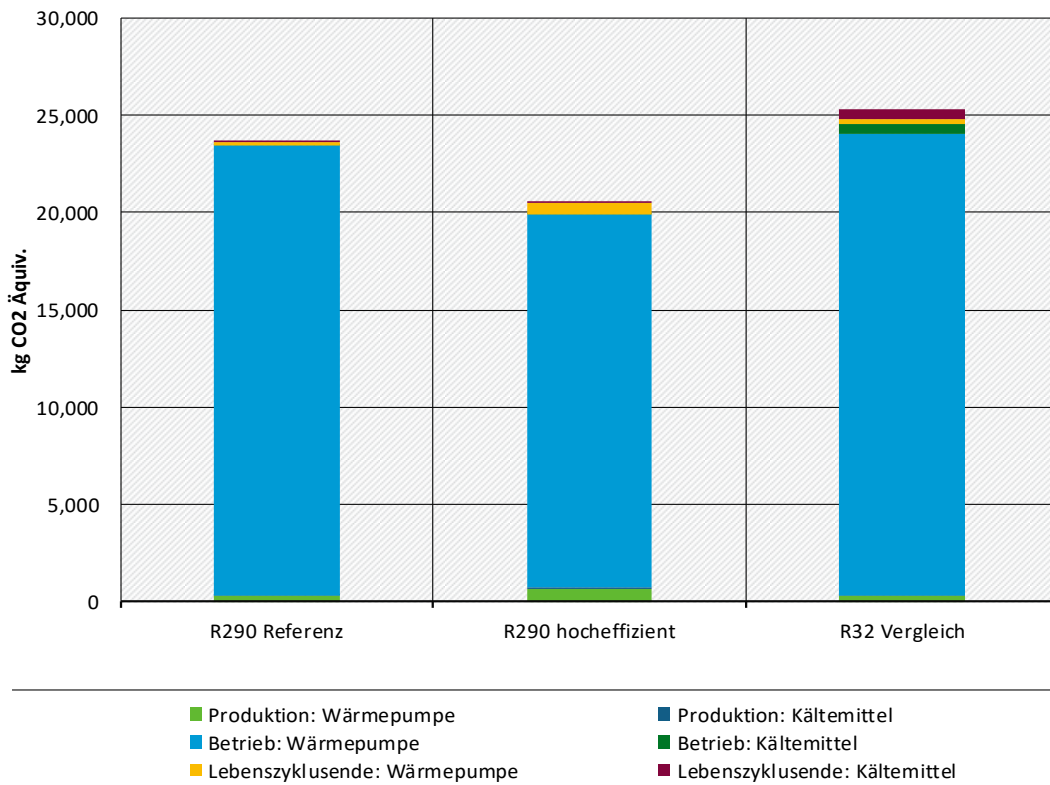
Bezogen auf den R290-Referenzfall steigen bei der hocheffizienten S/W-WP mit R290 die THG-Emissionen in der Herstellungsphase und am Lebenszyklusende der Wärmepumpe geringer an (jeweils um circa 11 Prozent)⁴⁸. Prozentual gesehen steigen aufgrund der erhöhten Kältemittelfüllmenge die THG-Emissionen in den Produktphasen des Kältemittels am stärksten an, verbleiben nicht zuletzt dank des vernachlässigbaren Treibhauspotenzials von R290 aber auf sehr niedrigem Niveau. Aufgrund der deutlichen Energieeffizienzsteigerung im Vergleich zum Referenzfall erreicht die hocheffiziente S/W-WP nach einer Lebensdauer von 15 Jahren eine Einsparung der THG-Emissionen um insgesamt circa 17 Prozent.

Die Verwendung des Kältemittels R32 in Wärmepumpen verstärkt die Umweltwirkungen gegenüber des Referenzfalls mit R290. Wie der modellierte Vergleichsfall verdeutlicht, verursacht vor allem der Wärmepumpenbetrieb mehr THG-Emissionen 615 kg CO₂-Äquivalent für die L/W-WP, +891 kg CO₂-Äquivalent für die S/W-WP), gefolgt vom Kältemittel am Lebenszyklusende (L/W-WP) bzw. des Kältemittels im Betrieb (S/W-WP). Im Vergleich zum R290-Referenzfall steigen die THG-Emissionen auf das 300-fache bei Betrieb des Kältemittels und auf das 200-fache am Lebenszyklusende (jeweils für beide Wärmepumpentypen), bedingt durch das Treibhauspotenzial von R32⁴⁹.

48 Annahme der Modellierung war aufgrund fehlender Herstellerangaben jedoch die gleiche Materialzusammensetzung wie im R290-Referenzfall.

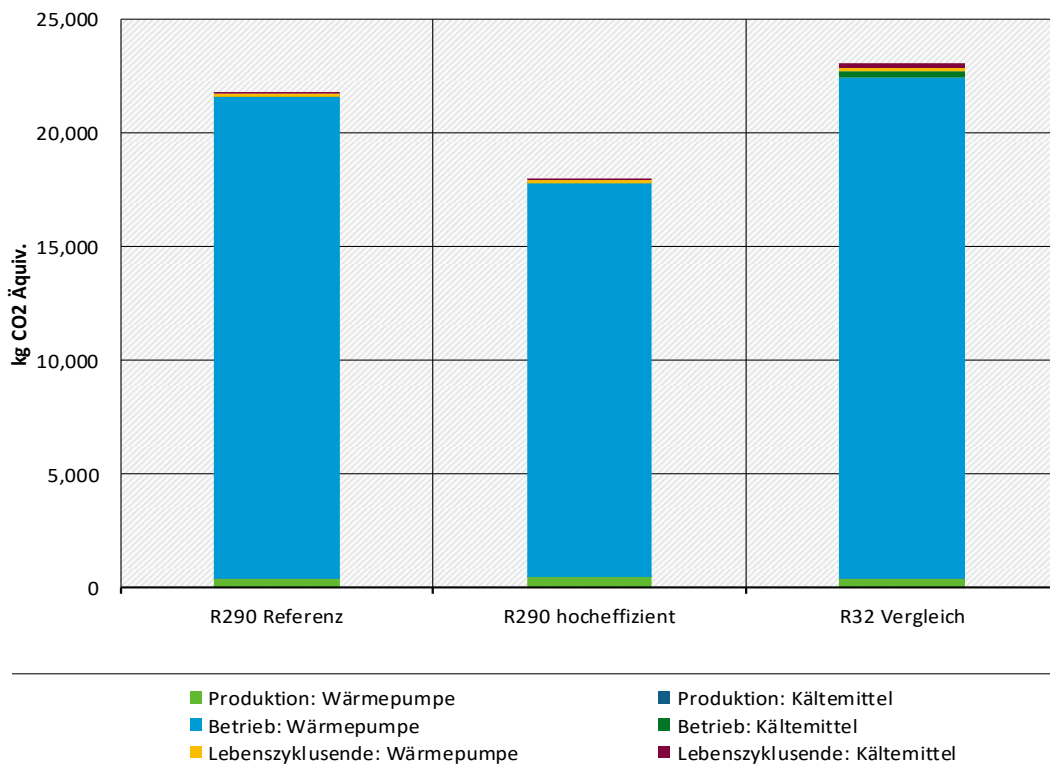
49 Das Treibhauspotenzial (GWP) von R32 wird in der Modellierung entsprechenden des Vierten Assessment-Berichts des IPCC mit 675 angenommen, da dies der rechtlich verbindliche Wert der F-Gas Verordnung ist (EU, 2014d). Basierend auf den neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen (Hodnebrog et al., 2020) ist derzeit eine Anhebung des GWP für R32 auf rund 800 in Diskussion.

Abbildung 35: Gegenüberstellung der THG-Emissionen aller Produktphasen der L/W-WP für R290-Referenzfall und Vergleichsfälle



Quelle: Eigene Darstellung, HEAT GmbH

Abbildung 36: Gegenüberstellung der THG-Emissionen aller Produktphasen der S/W-WP für R290-Referenzfall und Vergleichsfälle



Quelle: Eigene Darstellung HEAT GmbH

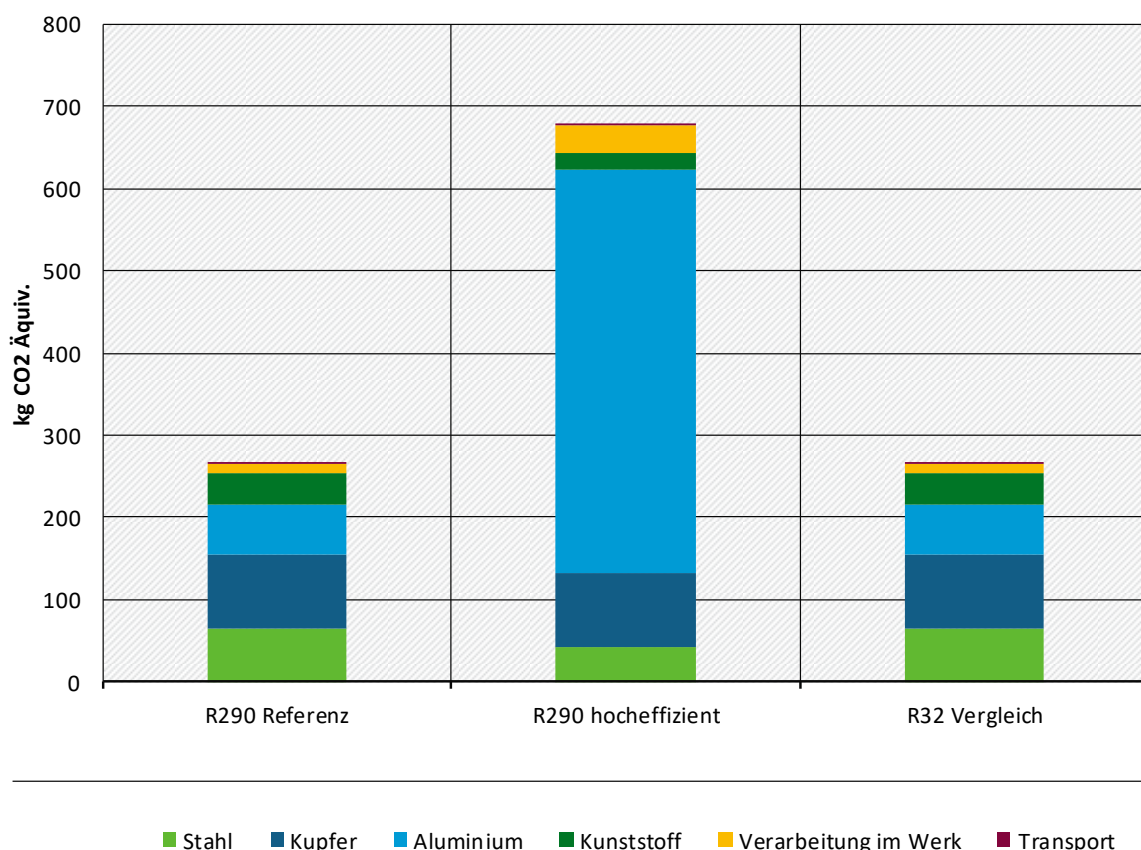
Analyse der Produktionsphase

In Abbildung 37 werden die THG-Emissionen in der Herstellungsphase untersucht. Neben der hier näher betrachteten Materialien Stahl, Kupfer, Aluminium und Kunststoff werden in der Herstellungsphase auch Transport, Verarbeitung im Werk und die Produktion des Kältemittels berücksichtigt.

Für den Fall der hocheffizienten L/W-WP mit R290 steigen die THG-Emissionen aufgrund des hohen Aluminium-Anteils und dessen hohen Energieaufwands in der Produktion drastisch an. Aluminium zeichnet für die hocheffiziente L/W-WP mit R290 für 492 kg CO₂-Äquivalent verantwortlich (R290-Referenzfall: 61 Kilogramm CO₂-Äquivalent). Insgesamt erhöhen sich die THG-Emissionen in der Herstellungsphase von 272 auf 682 Kilogramm CO₂-Äquivalent. Diese Erhöhung steht einer Einsparung der THG-Emissionen im Wärmepumpenbetrieb von 3.900 Kilogramm CO₂-Äquivalent über 15 Jahre Laufzeit gegenüber.

Der L/W-WP mit R32 liegen die gleichen Annahmen der Materialzusammensetzung zugrunde. Damit ist die Veränderung im Vergleich zum R290-Referenzfall auf das Kältemittel limitiert. Hierbei steigen die THG-Emissionen von 5,1 auf 9,7 Kilogramm CO₂-Äquivalent an, wodurch die gesamten THG-Emissionen im Herstellungsprozess um knapp unter 2 Prozent ansteigen.

Abbildung 37: THG-Emissionen nach Anteilen während der Produktionsphase der L/W-WP für R290-Referenzfall und Vergleichsfälle



Quelle: Eigene Darstellung, HEAT GmbH

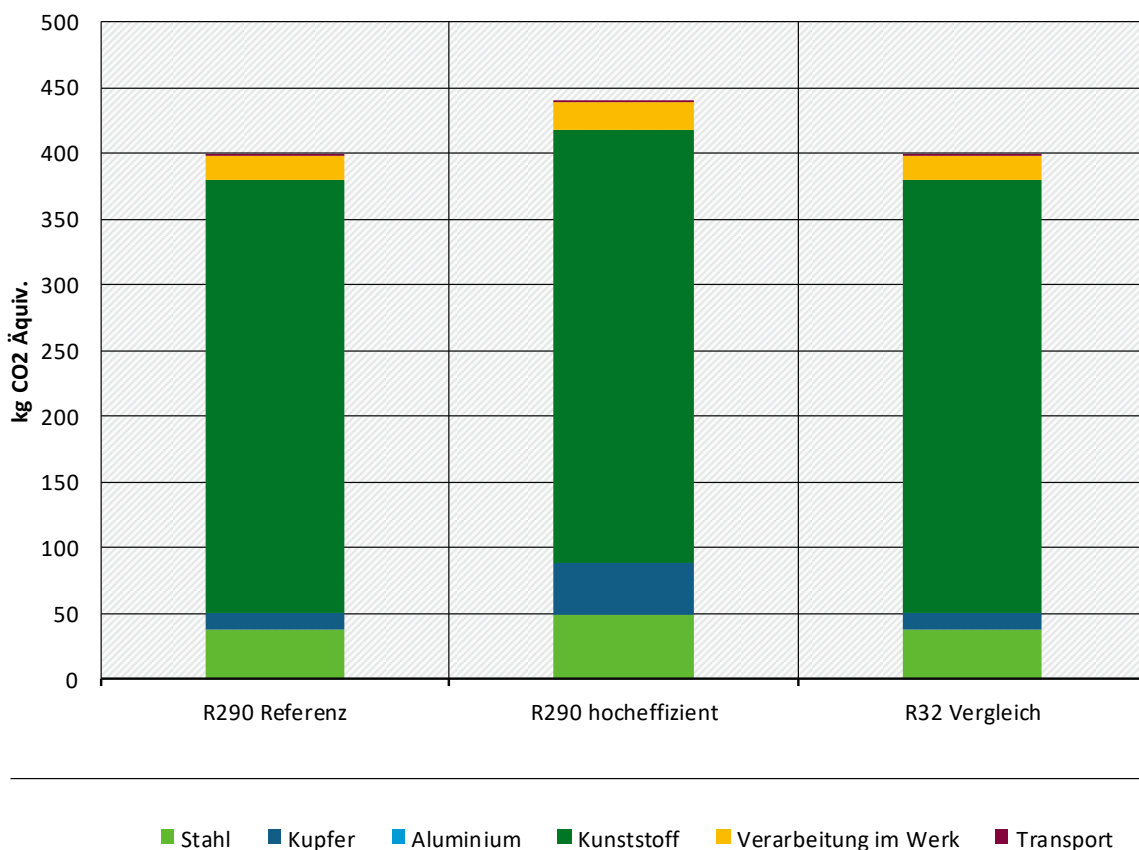
Bei der Betrachtung der THG-Emissionen in der Herstellungsphase der S/W-WP dominiert aufgrund der Erschließung der Wärmequelle mit Erdkollektoren Kunststoff den Materialeinsatz (Abbildung 38). Die Produktion von rund 270 Kilogramm Kunststoff (Gesamtgewicht der

Wärmepumpenanlage mit Wärmequellenkreis: 390 Kilogramm) verursacht THG-Emissionen in Höhe von 329 Kilogramm CO₂-Äquivalent, welche zwischen 73 und 82 Prozent an den gesamten THG-Emissionen in der Herstellungsphase ausmachen.

Der Referenzfall der S/W-WP mit R290 verursacht in der Herstellungsphase mit 402 Kilogramm CO₂-Äquivalent um 48 Prozent mehr THG-Emissionen als der Referenzfall der R290-L/W-WP.

In beiden zugehörigen Vergleichsfällen ergeben sich eher geringe Erhöhungen der THG-Emissionen. Die hocheffiziente R290-Wärmepumpe verursacht 11 Prozent mehr THG-Emissionen aufgrund des für die Außenaufstellung benötigten Hydraulikmoduls, welches 90 Kilogramm zusätzlich an Stahl und Kupfer erfordert sowie den zugehörigen Aufwand für die Verarbeitung im Werk erhöht. Für die mit R32 betriebene S/W-WP des Vergleichsfalls entstehen bei sonst gleichem Materialeinsatz zusätzliche THG-Emissionen von 2 Kilogramm CO₂-Äquivalent für die Kältemittelherstellung.

Abbildung 38: THG-Emissionen nach Anteilen während der Produktionsphase der S/W-WP für R290-Referenzfall und Vergleichsfälle



Quelle: Eigene Darstellung, HEAT GmbH

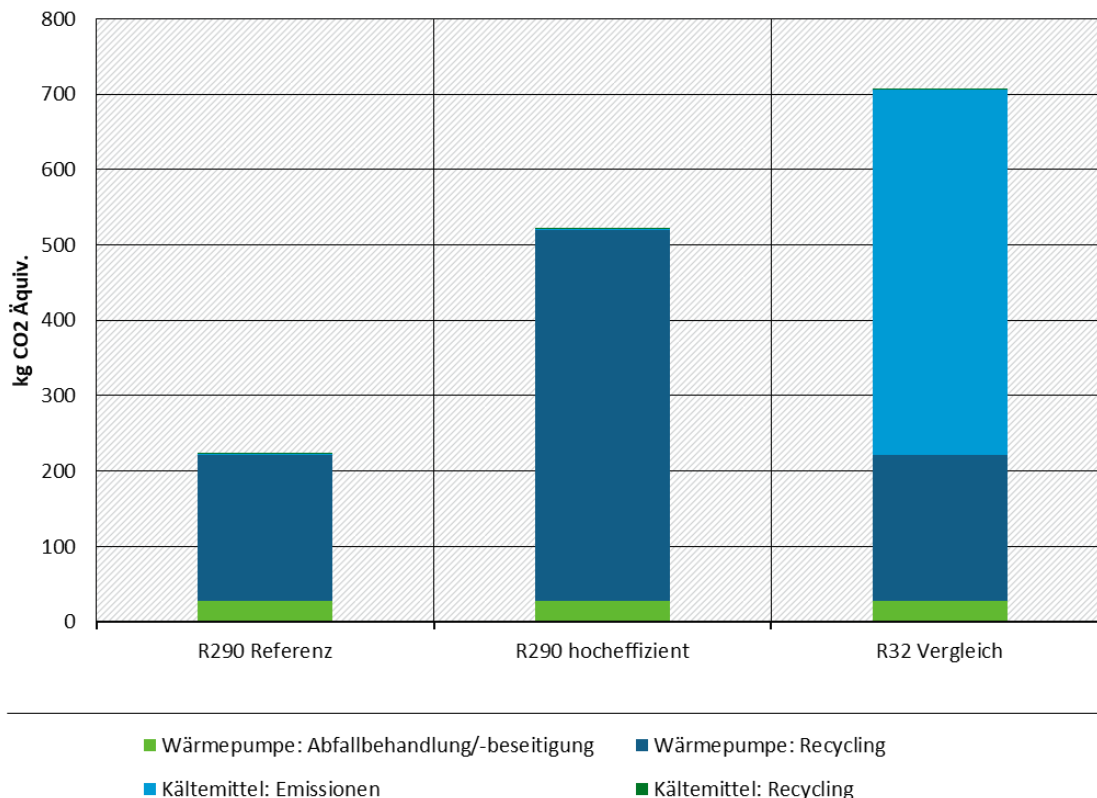
Analyse des Lebenszyklusendes

Am Ende des Lebenszyklus trägt im R290-Referenzfall der Energieaufwand für Recycling der Materialien bei Weitem die meisten THG-Emissionen bei, dessen Anteil für die hocheffizienten Wärmepumpen noch ansteigt. Für die mit R32 betriebenen Wärmepumpen werden durch das Kältemittel, bei zugrunde gelegter Leckagerate von 35,2 Prozent (Ökobaudat, 2019), am meisten THG-Emissionen ausgestoßen (Abbildung 39).

Die hocheffiziente L/W-WP mit R290 verzeichnet durch den erhöhten Energieaufwand für Recycling einen Anstieg der THG-Emissionen um insgesamt 130 Prozent im Vergleich zum

R290-Referenzfall. Der Mehraufwand ist hauptsächlich im beträchtlichen Materialeinsatz von Aluminium begründet. Der Vergleichsfall der mit R32 betriebenen L/W-WP verzeichnet einen Anstieg um insgesamt 217 Prozent gegenüber der im R290-Referenzfall verursachten THG-Emissionen, die zum überwiegenden Teil durch die Freisetzung des HFKW-Kältemittels entstehen, welches im Vergleich zu R290 ein hohes Treibhauspotenzial (nach derzeitiger Einstufung 675) enthält. Geringe Emissionen entstehen beim Recycling von R32, Wiederaufarbeitung oder Zerstörung wurden nicht mitberücksichtigt.

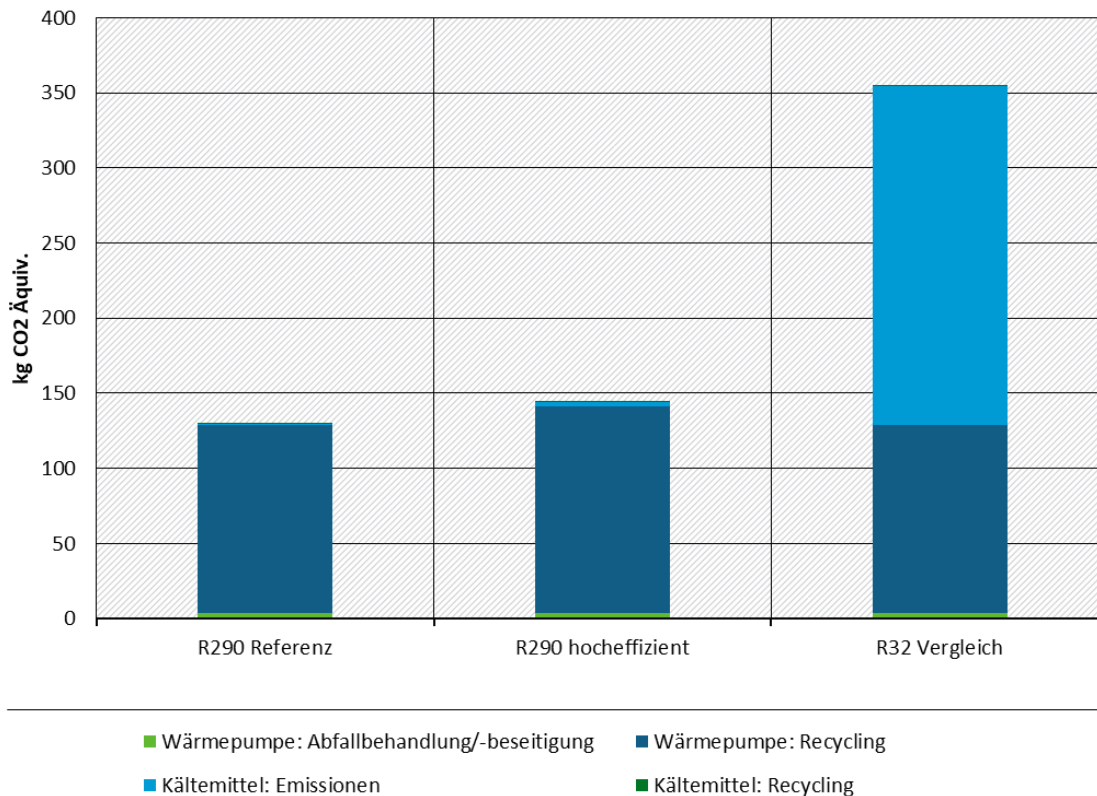
Abbildung 39: THG-Emissionen nach Anteilen am Lebenszyklusende der L/W-WP für R290-Referenzfall und Vergleichsfälle.



Quelle: Eigene Darstellung HEAT GmbH

Die THG-Emissionen am Lebenszyklusende der hocheffizienten S/W-WP mit R290 erhöhen sich um 12 Prozent gegenüber des R290-Referenzfalls, überwiegend aufgrund des Energieaufwands für Recycling des zusätzlich benötigten Hydraulikmoduls (Abbildung 40). Für den Vergleichsfall der mit R32 betriebenen L/W-WP steht aufgrund der Freisetzung des HFKW-Kältemittels mit hohem Treibhauspotenzial im Vergleich zu R290 ein Anstieg um insgesamt 174 Prozent gegenüber der im R290-Referenzfall verursachten THG-Emissionen zu Buche.

Abbildung 40: THG-Emissionen nach Anteilen am Lebenszyklusende der S/W-WP für R290-Referenzfall und Vergleichsfälle

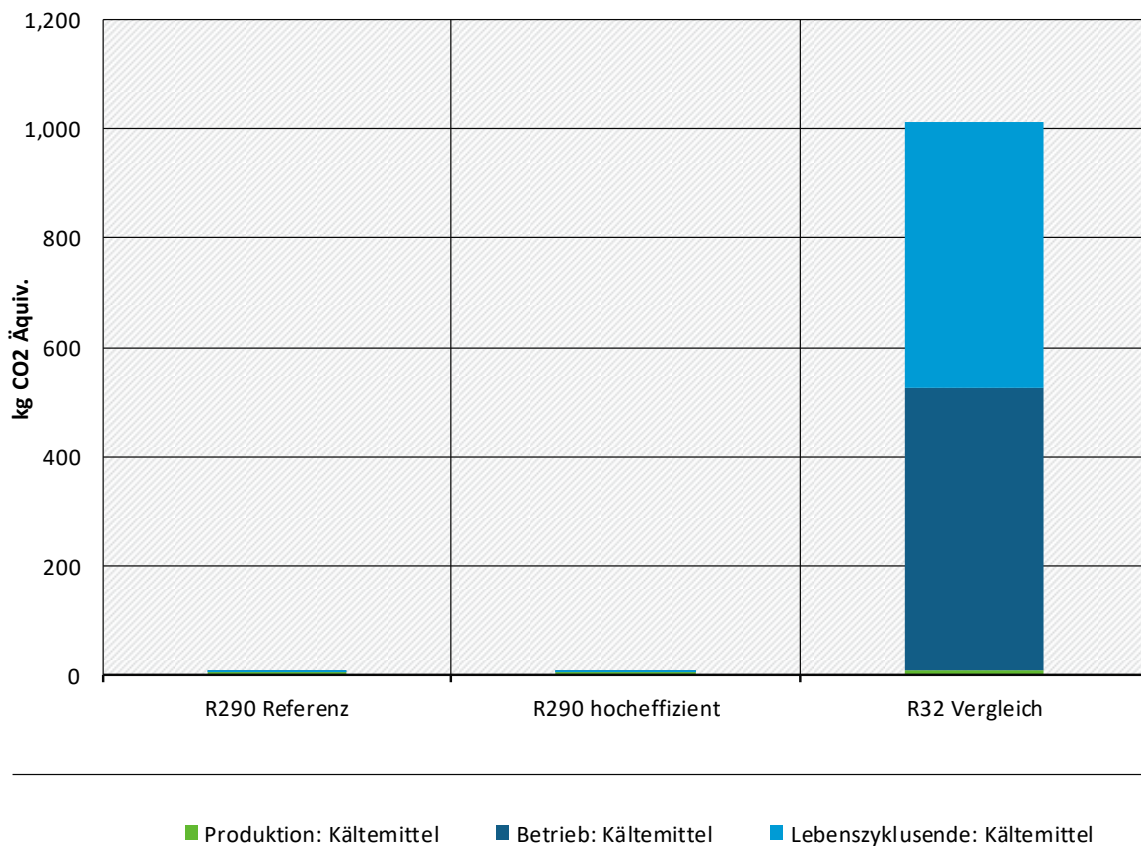


Analyse des Kältemittels über den gesamten Lebenszyklus

Bei der folgenden Betrachtung werden alle Prozesse im Lebenszyklus des Kältemittels einbezogen. Es handelt sich hierbei nicht ausschließlich um direkte Emissionen, die durch Austritt des Kältemittels in die Atmosphäre (Leckage) entstehen. Vielmehr wird bei der vorliegenden Analyse auch der Energieaufwand für Kältemittelherstellung und -recycling berücksichtigt. Zusätzlich werden die THG-Emissionen durch Kältemittelleckage in der jeweiligen Lebenszyklusphase angegeben.

Die durch Kältemittel verursachten THG-Emissionen belaufen sich über den gesamten Lebenszyklus des Kältemittels im R290-Referenzfall beider Wärmepumpenbauarten auf jeweils weniger als 10 Kilogramm CO₂-Äquivalent, wie auch für den Vergleichsfall der hocheffizienten L/W-WP mit R290 (Abbildung 41). Im R32-Vergleichsfall der L/W-WP entstehen durch Verwendung des HFKW-Kältemittels THG-Emissionen von etwas mehr als 1.000 Kilogramm CO₂-Äquivalent. Diese verteilen sich zu nahezu gleichen Teilen auf den Betrieb und das Lebenszyklusende bei vergleichsweise marginalem Anteil der Kältemittelherstellung. Auch die THG-Emissionen während der Herstellung liegen jedoch über denjenigen der Fallbeispiele mit R290.

Abbildung 41: THG-Emissionen durch Kältemittel nach Anteilen am Produktzyklus für L/W-WP für R290-Referenzfall und Vergleichsfälle

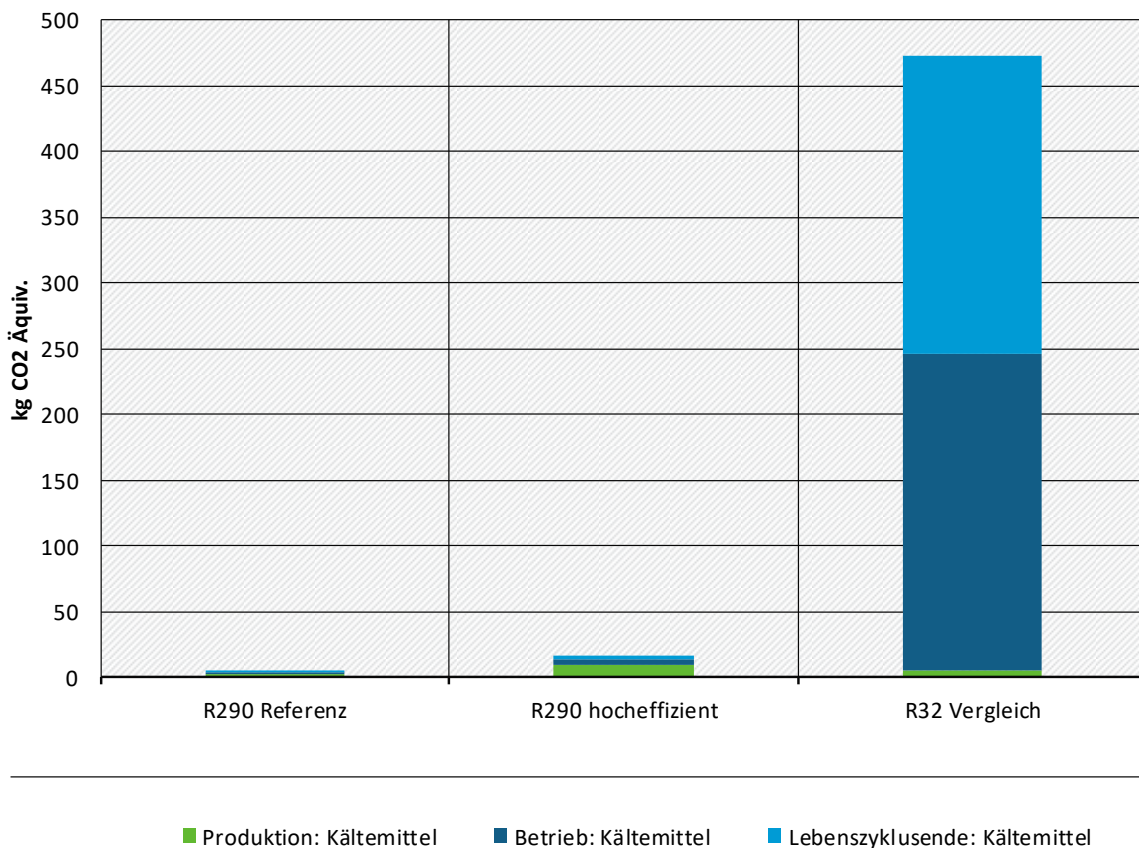


Quelle: Eigene Darstellung HEAT GmbH

Für die Gegenüberstellung der Fallbeispiele der S/W-WP zeichnet sich ein ähnliches Bild (Abbildung 42). Aufgrund der erhöhten Kältemittelfüllmenge verursacht die außen aufgestellte, hocheffiziente R290-Wärmepumpe THG-Emissionen von insgesamt 17 Kilogramm CO₂-Äquivalent.

Die geringeren Kältemittelfüllmengen in der S/W-WP führen auch im R32-Vergleichsfall zu geringeren THG-Emissionen als bei der L/W-WP. Diese liegen bei 472 Kilogramm CO₂-Äquivalent, welche sich wiederum zu nahezu gleichen Teilen auf den Betrieb und das Lebenszyklusende bei vergleichsweise marginalem Anteil der Kältemittelherstellung verteilen.

Abbildung 42: THG-Emissionen durch Kältemittel nach Anteilen am Produktzyklus für S/W-WP für R290-Referenzfall und Vergleichsfälle



Quelle: Eigene Darstellung HEAT GmbH

4.3.3 Quantitative Bewertung weiterer Umweltwirkungen

In diesem Unterkapitel werden über THG-Emissionen und kumulierten Energieverbrauch hinausgehende Umweltwirkungen von Wärmepumpen über deren gesamten Lebenszyklus betrachtet und quantifiziert. Betrachtete Umweltwirkungen sind Süßwasserressourcen (FW), gefährlicher Abfall zur Deponie (HWD), nicht gefährlicher Abfall (NHWD), radioaktiver Abfall (RWD), Versauerungspotenzial (AP), Eutrophierungspotenzial (EP), Potenzial für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen (ADPE) und das Potenzial für den abiotischen Abbau fossiler Brennstoffe (ADPF). Für die Analyse wurden Datensätze von Ökobaumat verwendet (Ökobaumat, 2018a, 2018d, 2018c, 2018b, 2018f, 2018g). Die Umweltwirkung von Kältemitteln wird in Abschnitt 4.3.3.2 separat betrachtet.

4.3.3.1 Weitere Umweltwirkungen von Wärmepumpen

In der nachfolgenden Betrachtung wurden die weiteren Umweltwirkungen der Wärmepumpen auf Basis der Ökobaumat-Datenbank generisch ermittelt und im Rahmen dieser Analyse auf 8 kW Heizleistung skaliert. Die verwendeten Daten entstammen einer L/W-WP (7 kW Split-System) und einer S/W-WP (10 kW) mit Erdsonde und datieren aus dem Jahr 2018 (Ökobaumat, 2018c, 2018b, 2018f, 2018g)⁵⁰.

⁵⁰ Gültigkeit bis 2022 laut Angaben in der Ökobaumat-Datenbank. Die Umweltwirkungen durch Betrieb der Wärmepumpen wurden auf Basis zusätzlicher Ökobaumat-Datensätze ermittelt (Abschnitt 8.6.01. Nutzung Wärmeerzeuger) und auf den modellierten gesamten Stromverbrauch aus Tabelle 28 skaliert.

Zusätzlich wurden für die Lebenszyklusphase Betrieb noch die weiteren Umweltwirkungen, die durch den Stromverbrauch entstehen, bilanziert. Hierzu wurde der Stromverbrauch aus Kapitel 4.3.2.1 angenommen. Die Umweltwirkungen der Stromerzeugung wurden aus Ökobaumat entnommen (Ökobaumat, 2018e)⁵¹ und sind nicht ganz vergleichbar mit den neuesten publizierten Werten aus Lauf et al., 2021. Beispielsweise wird das Versauerungspotenzial mit 0,0006319 Kilogramm SO₂ Äquivalenten angegeben, im Vergleich zu 0,000564 Kilogramm SO₂ Äquivalenten in Lauf et al., 2021. In diesem Fall wurde der aktuellere Wert gewählt. Die weiteren Umweltwirkungen entstehen durch die Benutzung von Materialien und indirekt durch den Energieverbrauch in Form von Elektrizität.

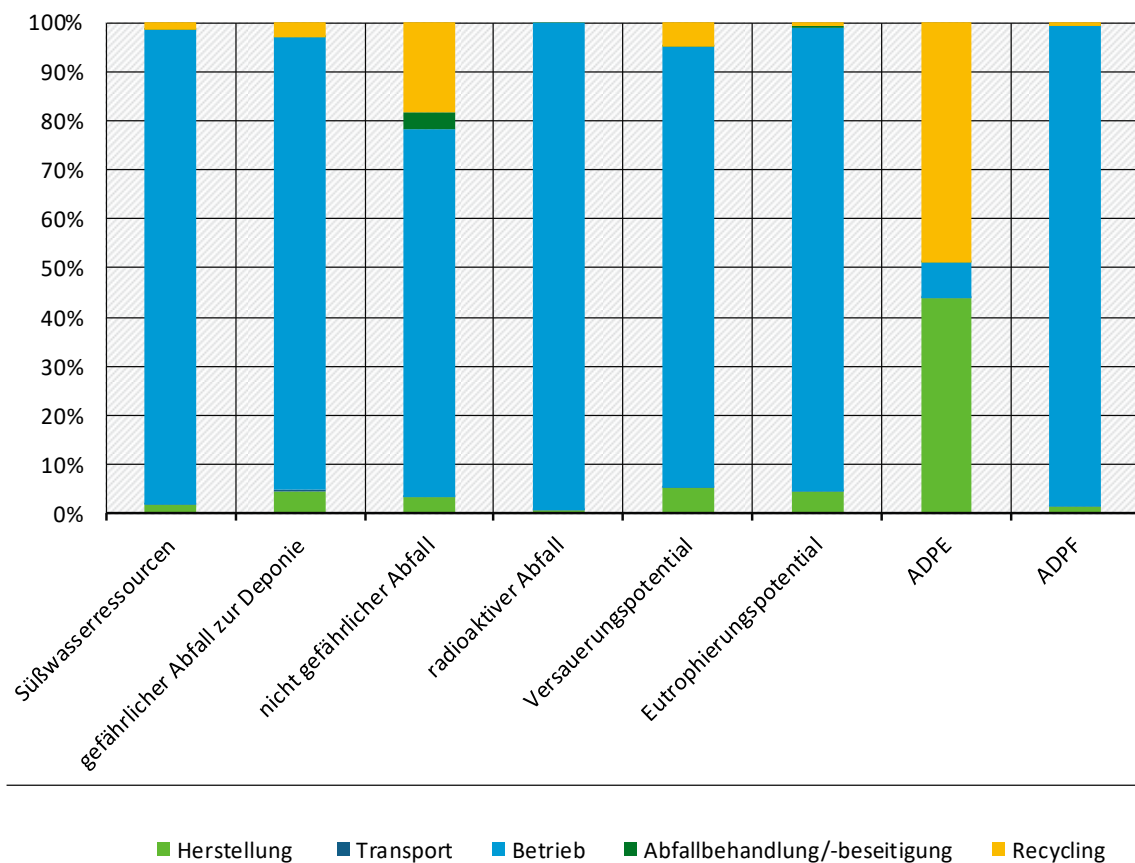
Die nachfolgenden Abbildungen illustrieren für die modellierte L/W- und die S/W-WP wie sich die identifizierten Umweltwirkungen auf die verschiedenen Lebenszyklusphasen der beiden betrachteten Wärmepumpenbauarten verteilen. Im Einzelnen werden die Umweltwirkungen durch Herstellung, Transport, Betrieb, Abfallbehandlung/-beseitigung und Recycling bewertet.

Bei beiden Wärmepumpentypen verantwortet meistens die Betriebsphase die größten Umweltwirkungen. Eine Ausnahme ist in beiden Fällen das Potential für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen, dem sowohl bei der Herstellung (44 Prozent bei der L/W-WP und 46 Prozent bei der S/W-WP) als auch beim Recycling (49 Prozent bei der L/W-WP und 32 Prozent bei der S/W-WP) eine höhere Bedeutung zukommt.

Bei der L/W-WP trägt die Betriebsphase zwischen 90 Prozent zum Versauerungspotenzial und 99 Prozent zum radioaktiven Abfall bei (Abbildung 43). Beim nicht gefährlichen Abfall beschränkt sich dies auf 75 Prozent, circa 21 Prozent kommen aus Recycling und Abfallbehandlung, weitere drei Prozent aus der Herstellung. Herstellung und Recycling tragen jeweils 5 Prozent zum Versauerungspotenzial bei.

⁵¹ Prozess-Datensatz: Strom-Mix-Szenario 2030; <1kV mit Gültigkeit bis 2022.

Abbildung 43: Umweltwirkungen einer L/W-WP nach Anteilen am gesamten Lebenszyklus



Quelle: Eigene Darstellung HEAT GmbH basierend auf Ökobaudat (Ökobaudat, 2018b, 2018g)

Die absoluten Werte der weiteren Umweltwirkungen (ohne THG-Emissionen und Energieaufwand) nach Produktphase der L/W-WP sind in Tabelle 31 dargestellt.

Tabelle 31: Weitere Umweltwirkungen einer L/W-WP

Absolute Zahlen, skaliert auf 8 kW Heizleistung; Daten des Betriebs skaliert auf den gesamten Stromverbrauch aus Tabelle 23

Wärmepumpentyp	L/W				
	Herstellung	Transport	Betrieb	Entsorgung ⁵²	Recycling
Süßwasserressourcen, in m ³	1,99	0,002	107	0,05	1,46
Gefährlicher Abfall zur Deponie, in kg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nicht gefährlicher Abfall, in kg	12,6	0,005	287	12,2	70,2
Radioaktiver Abfall, in kg	0,10	0,00	17,9	0,00	0,00
Versauerungspotenzial, in kg SO ₂ Äquivalent	2,25	0,004	39,2	0,004	2,17
Eutrophierungspotenzial, in kg Phosphat Äquivalent	0,31	0,001	6,28	0,004	0,06

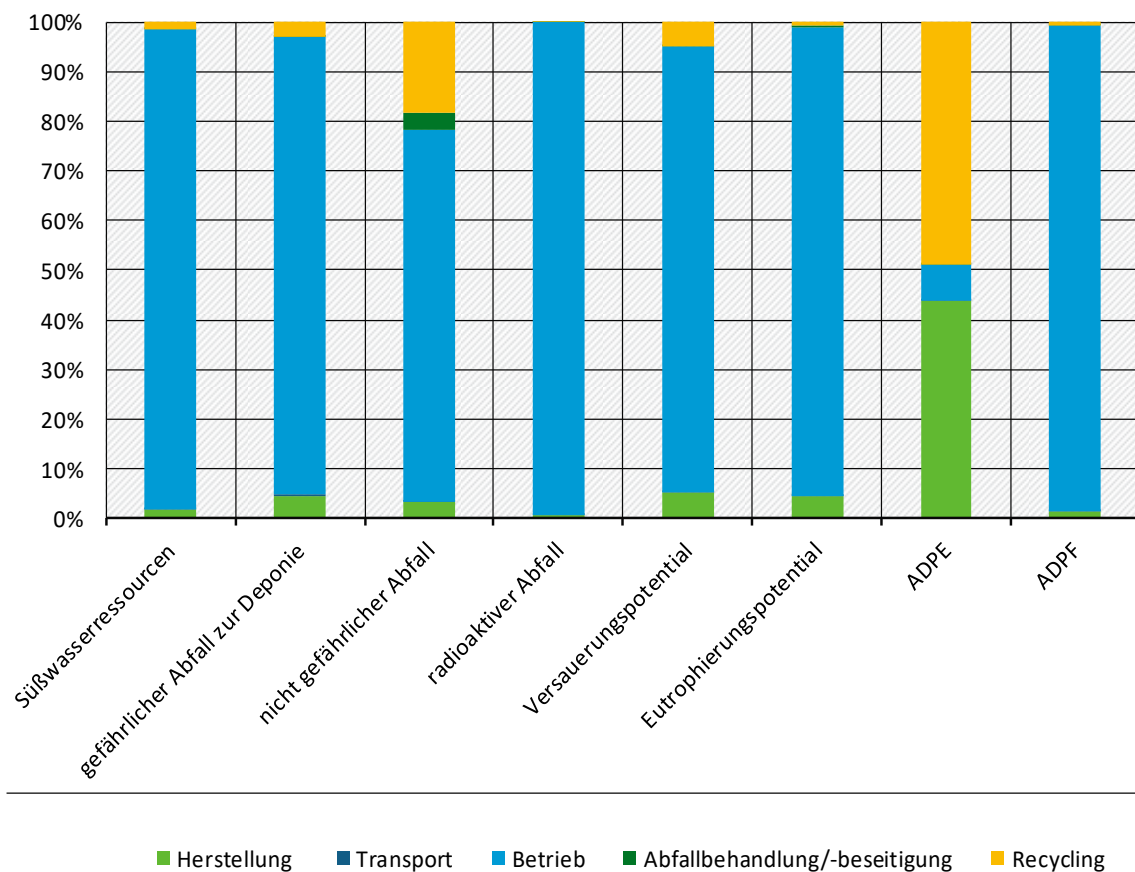
⁵² Abfallbehandlung und -beseitigung

Wärmepumpentyp	L/W				
Potenzial für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen, in kg Sb Äquivalent	0,09	0,00	0,01	0,00	0,10
Potenzial für den abiotischen Abbau fossiler Brennstoffe, in MJ	4.437	12,9	310.120	12,0	1.839

Quelle: Ökobaumat (Ökobaumat, 2018b)

Die Anteile der einzelnen Produktphasen an den betrachteten Umweltwirkungen der S/W-WP (Abbildung 44) sind in den meisten Kategorien ähnlich zu denjenigen der L/W-WP. Die Betriebsphase ist sogar für noch höhere Anteile an den Umweltwirkungen verantwortlich, von 88 Prozent bei nicht gefährlichen Abfällen zu fast 100 Prozent bei radioaktiven Abfällen. Die Umweltauswirkungen aus dem Transport und der Abfallbehandlung sind vernachlässigbar gering. Die Herstellung trägt zu 6 Prozent und Recycling zu 5 Prozent zu den nicht gefährlichen Abfällen und die Herstellung nochmal 5 Prozent zum Versauerungspotenzial bei.

Abbildung 44: Umweltwirkungen einer S/W-WP nach Anteilen am gesamten Lebenszyklus



Quelle: Eigene Darstellung HEAT GmbH basierend auf Ökobaumat (Ökobaumat, 2018c, 2018f)

Die absoluten Werte der weiteren Umweltwirkungen nach Produktphase der S/W-WP sind in Tabelle 32 dargestellt.

Tabelle 32: Weitere Umweltwirkungen einer S/W-WP

Absolute Zahlen, skaliert auf 8 kW Heizleistung; Daten des Betriebs skaliert auf den gesamten Stromverbrauch aus Tabelle 28.

Wärmepumpentyp	Sole/Wasser				
Kategorie	Herstellung	Transport	Betrieb	Entsorgung ⁵³	Recycling
Süßwasserressourcen, in m ³	1,04	0,002	97,8	0,01	0,33
Gefährlicher Abfall zur Deponie, in kg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nicht gefährlicher Abfall, in kg	17,2	0,004	262	4,97	13,5
Radioaktiver Abfall, in kg	0,05	0,00	16,4	0,00	0,02
Versauerungspotenzial, in kg SO ₂ Äquivalent	1,78	0,01	35,8	0,001	0,81
Eutrophierungspotenzial, in kg Phosphat Äquivalent	0,06	0,001	5,74	0,00	0,03
Potenzial für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen, in kg Sb Äquivalent	0,03	0,00	0,01	0,00	0,02
Potenzial für den abiotischen Abbau fossiler Brennstoffe, in MJ	3.798	12,6	283.366	2,34	1.042

Quelle: Ökobaudat (Ökobaudat, 2018c)

4.3.3.2 Weitere Umweltwirkungen von Kältemitteln

In den nachfolgenden Abbildungen wird gezeigt, wie sich wesentliche Umweltwirkungen (genannt unter 4.3.3) auf Herstellung und Recycling der Kältemittel verteilen. Diese Darstellungen beinhalten nicht die THG-Emissionen durch Betrieb und Entsorgung der Kältemittel, diese wurden auf Basis der modellierten Wärmepumpen mit einer Heizleistung von 8 kW bereits in Abschnitt 4.3.2 dargestellt.

Zu diesem Zweck wird das natürliche Kältemittel R290 betrachtet und dem HFKW-Kältemittel R32 gegenübergestellt. Die Analyse der Umweltwirkungen durch Kältemittel basiert auf Datensätzen von Ökobaudat und bezieht sich jeweils auf 1 Kilogramm Kältemittel. Der Eintrag von Trifluoressigsäure (TFA) in Süßwasserressourcen ist in den vorliegenden Ökobaudat-Daten von 2018 nicht berücksichtigt⁵⁴.

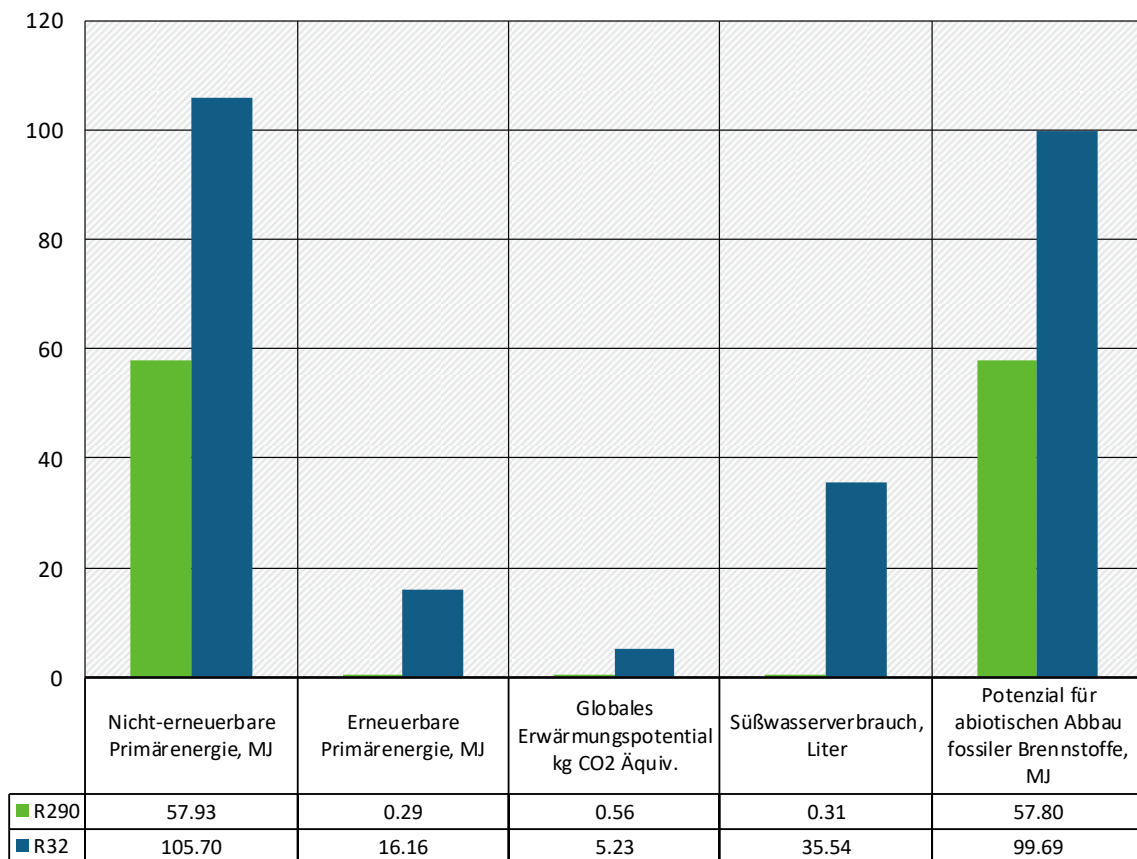
Da für Recycling die generische Annahme zugrunde liegt, dass 91 Prozent der jeweiligen Umweltwirkung für den Herstellprozess erneut aufgewendet werden, sind die Umweltwirkungen für Recycling nicht grafisch dargestellt. Am Ende dieses Abschnitts sind alle Umweltwirkungen für Herstellung und Recycling beider Kältemittel aufgelistet (siehe Tabelle 33). Aufgrund der sehr unterschiedlichen Dimensionen erfolgt die Darstellung absoluter Zahlen aufgeteilt in 2 Bereiche, auf einer Skala bis 120 beziehungsweise bis 0,05. Zur besseren Übersicht ist die jeweilige physikalische Einheit zusammen mit der Kategorie dargestellt, in der integrierten Tabelle darunter sind die absoluten Zahlen aufgelistet. Das Potenzial für abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen sowie gefährlicher Abfall zur Deponie sind aufgrund der kleinen

⁵³ Abfallbehandlung und -beseitigung

⁵⁴ R32 wird nicht zu TFA abgebaut. Die neuesten von Kältemittelherstellern vorgeschlagenen synthetischen Kältemittelooptionen basieren jedoch auf ungesättigten fluorierten Kohlenwasserstoffen (HFO) wie R-1234yf, bei deren Abbau TFA entsteht.

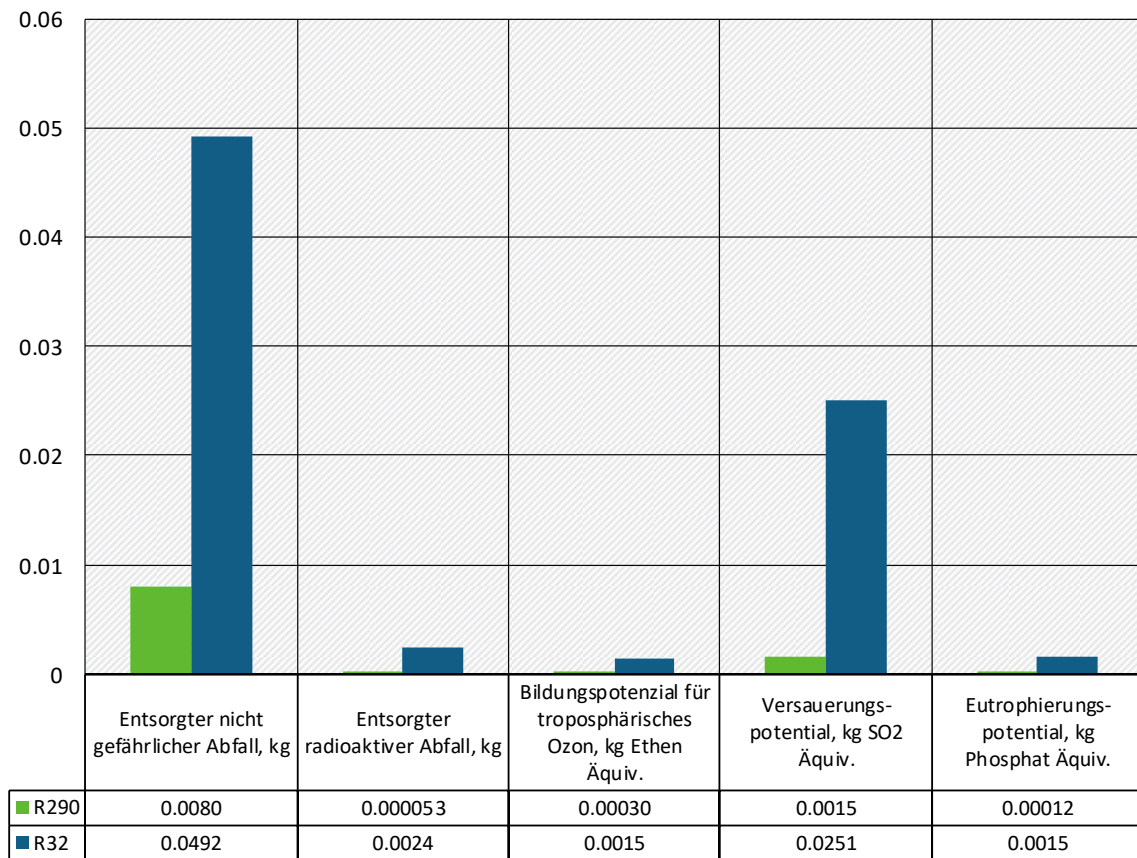
Dimensionen nicht grafisch dargestellt, es wird auf Tabelle 33 verwiesen. Die Abbildungen zeigen deutlich auf, dass die Herstellung von R32 in jeder Kategorie weit höhere Umweltwirkungen verursacht als R290. Für gesamte Primärenergie, nicht-erneuerbare Primärenergie und das Potenzial für abiotischen Abbau fossiler Brennstoffe verursacht R32 bis zum Doppelten der Umweltwirkung durch R290. Die Umweltwirkung des Kältemittels R32 durch Globales Erwärmungspotenzial, Potenzial für abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen, entsorgten nicht gefährlichen Abfall und Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon liegt jeweils im Bereich des fünf- bis zehnfachen der entsprechenden Umweltwirkung durch R290. In Form von Eutrophierungspotenzial, gefährlichem Abfall zur Deponie und Versauerungspotenzial wird der Herstellung von R32 jeweils eine Umweltwirkung im Bereich des 12- bis 16-fachen der Umweltwirkung durch R290 zugeordnet. Für entsorgten radioaktiven Abfall und erneuerbare Primärenergie bewegt sich die Umweltwirkung durch Herstellung von R32 bei dem 45- bis 55-fachen von R290, während der Süßwasserverbrauch für die Herstellung von R32 das 115-fache beträgt der Herstellung von R290 beträgt.

Abbildung 45: Ausgewählte Umweltwirkungen durch Herstellung von 1 Kilogramm Kältemittel des Typs R290 und R32



Quelle: Eigene Darstellung HEAT GmbH basierend auf Ökobaudat (Ökobaudat, 2018d, 2018a)

Abbildung 46: Ausgewählte Umweltwirkungen durch Herstellung von 1 Kilogramm Kältemittel des Typs R290 und R32



Quelle: Eigene Darstellung HEAT GmbH, basierend auf Ökobaudat (Ökobaudat, 2018a, 2018d)

Nachfolgend ist eine Auswahl identifizierter Umweltwirkungen für Herstellung und Recycling von R290 sowie R32 aufgelistet.

Tabelle 33: Umweltwirkungen bei Herstellung und Recycling ausgewählter Kältemittel je 1 Kilogramm Kältemittel

Kategorie	Herstellung		Recycling	
	R290	R32	R290	R32
Kältemittel				
Gesamte Primärenergie, in MJ	58,2	122	52,9	111
Nicht-erneuerbare Primärenergie, in MJ	57,9	106	52,7	96,1
Erneuerbare Primärenergie, in MJ	0,29	16,2	0,27	14,7
Globales Erwärmungspotenzial, in kg CO ₂ Äquiv.	0,56	5,2	0,51	4,8
Süßwasserressourcen, in Liter	0,31	35,5	0,28	32,3
Potenzial für den abiotischen Abbau fossiler Brennstoffe, in MJ	57,8	99,7	52,6	90,6
Potenzial für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen, in kg Sb Äquivalent	0,00	0,00	0,00	0,00
Gefährlicher Abfall zur Deponie, in kg	0,00	0,00	0,00	0,00

Kategorie	Herstellung		Recycling	
Entsorgter nicht gefährlicher Abfall, in kg	0,008	0,05	0,01	0,04
Entsorgter radioaktiver Abfall, kg	0,00	0,002	0,00	0,002
Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon, kg Ethen Äquivalent	0,00	0,002	0,00	0,001
Versauerungspotenzial, in kg SO ₂ Äquivalent	0,002	0,03	0,001	0,02
Eutrophierungspotenzial, in kg Phosphat Äquivalent	0,00	0,001	0,00	0,001

Quelle: Ökobaumat (Ökobaumat, 2018a, 2018d)

5 Rückmeldung von Stakeholdern zu möglichen Anforderungen

Die Einbindung von Stakeholdern und die Berücksichtigung von deren Perspektiven ist ein entscheidendes Element der Entwicklung von Anforderungen für einen Blauen Engel für Hauswärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln und wichtig für die Akzeptanz des Umweltzeichens. Dies gilt umso mehr angesichts der Tatsache, dass das bis Ende 2017 verfügbare Umweltzeichen (UZ-118) keine Zeichennehmer fand (siehe Kapitel 1.4.1). Die Deutsche Umwelthilfe e.V. und die HEAT GmbH haben daher im Dezember 2020 einen Auftakt-Workshop mit Vertreter*innen der Industrie veranstaltet und zwischen Februar und August 2021 12 Online-Interviews mit Expertinnen und Experten aus der Branche geführt – hierzu zählen insbesondere Hersteller von Wärmepumpen, Zulieferer, Branchenverbände und Forschungseinrichtungen. Die Experteninterviews hatten eine Dauer von 90-120 Minuten und wurden auf Basis eines strukturierten Gesprächsleitfadens geführt. Hersteller wurden darüber hinaus gebeten, in einem Zusatzfragebogen eine quantitative Abschätzung u.a. zu den aktuellen und künftigen Anteilen von Kältemitteln und Bauarten am Wärmepumpenabsatz vorzunehmen. Aus den bisherigen Interviews lassen sich bereits klare Tendenzen erkennen, wie ein neues Umweltzeichen seitens der Branche bewertet wird und welche Anforderungen für sinnvoll erachtet werden. Die wesentlichen Ergebnisse werden im Folgenden zusammenfassend dargestellt.

5.1 Einschätzung der Marktentwicklung (Geltungsbereich)

- ▶ Unter anderem aufgrund der guten Eignung für die zu erwarteten Absatzanteile der verschiedenen Wärmepumpenbauarten wird Propan (R290) im Bereich der Hauswärmepumpen die zentrale Rolle unter den natürlichen Kältemitteln beigemessen.
- ▶ Für den Bestand bzw. die Sanierung werden aktuell und auch künftig außen aufgestellte L/W-WP (Monoblock) als dominierende Bauart erachtet.
- ▶ Bei Neubauten wird ein wachsender Anteil von innen aufgestellten Wärmepumpen prognostiziert (u.a. wegen der Schallemissionen und des Platzbedarfs bei Außenaufstellung).
- ▶ Bei der Innenaufstellung erweise sich bei Anlagen mit R290 die für Haushaltsgeräte gebräuchliche Füllmengenbegrenzung auf 150 Gramm Kältemittel derzeit als limitierend für einen signifikanten Marktanteil in diesem Anwendungsbereich. Es gibt aber Hersteller im Markt, die Lösungen für Wärmepumpen mit größeren Füllmengen auch für die Innenaufstellung anbieten.

5.2 Umweltgerechte und ressourcenschonende Produktgestaltung

- ▶ Gehäuse und Blechteile sind in der Regel so ausgelegt, dass Bauteile mit geringem Materialeinsatz produziert werden. Die eingesetzten Materialien sind weitestgehend recyclingfähig. Dämm- und Isolierstoffe müssen ohne F-Gase geschäumt sein. Eine weitere Reduktion von Verpackungsmaterialien sei denkbar (kein Styropor und weniger Folien).
- ▶ Ein Hersteller verweist zudem auf Lieferantenerklärungen, mit denen Zulieferer die Herkunft des Produkts nachweisen müssen.
- ▶ Eine Betrachtung der Umweltbilanz des gesamten Produktlebenszyklus wird als wichtig erachtet (u.a. Umweltwirkungen von Kältemitteln jenseits des GWP); ein Hersteller verweist

beispielhaft darauf, dass eine Kältemittelhavarie bei einer typischen R410A-Anlage etwa so klimaschädlich wie der Betrieb über 20 Jahre sei (mit landesüblichem Strommix).

- ▶ Bezüglich der im Markt verwendeten Materialien: Polypropylen wird teils eingesetzt, um die Luftführung zu verbessern. Dies sollte aber möglichst vermieden werden – eine Alternative wären Blechdüsen. Es sollten möglichst wenig Kunststoffe wie extrudiertes Polypropylen eingesetzt werden.
- ▶ Die wichtigsten Stellschrauben, um die Materialeffizienz zu verbessern, sind der Einsatz von Rezyklaten und Rücknahmesysteme.

5.3 Energieeffizienz und Leistungszahlen

- ▶ R290 wird aus thermodynamischer Perspektive als gut geeignetes Kältemittel erachtet. Die Effizienz von R290-Wärmepumpen wird als gleich gut bzw. teils etwas besser bewertet als jene von vergleichbaren Anlagen mit synthetischen Kältemitteln.
- ▶ Inwiefern weitere Effizienzsteigerungen (im Rahmen der bisherigen Preisgestaltung) möglich sind, wird unterschiedlich bewertet. Einige Hersteller sehen zu hohe Anforderungen in einem Umweltzeichen kritisch. Als mögliche Zielmarken für die Effizienz wurden Anforderungen oberhalb des EHPA-Quality Labels bzw. ein Mindest-Effizienzwert im oberen Drittel des Marktdurchschnittes genannt.
- ▶ Limitierend für weitere Effizienzsteigerungen sind insbesondere die verfügbaren Komponenten und die Elektronik, welche oftmals nicht für den Einsatz in Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln optimiert sind (insbesondere Kompressor). Allerdings sind u.a. bei Kompressoren derzeit mehrere Weiterentwicklungen/Forschungsprojekte für natürliche Kältemittel im Gang, sodass in den nächsten Jahren bessere Komponenten zur Verfügung stehen werden.
- ▶ Als weitere Maßnahmen zur Effizienzsteigerung wurden u.a. modulierende Kompressoren, verbesserte Wärmetauscher, ein intelligentes Speicher- und Lastmanagement sowie ein optimiertes Design der Ventilatoren mit weniger Strömungsverlusten genannt.

5.4 Sicherheitsvorkehrungen bei Verwendung natürlicher (brennbarer A3) Kältemittel

- ▶ Eine Erhöhung der Füllmenge bei R290 von derzeit 150 Gramm auf 500 Gramm wird von allen interviewten Herstellern als beherrschbare Größe für Innenaufstellung erachtet. Dies würde eine Leistung von bis zu 10 Kilowatt ermöglichen und ginge daher mit einem deutlich breiteren Einsatzbereich von natürlichen Kältemitteln einher. Voraussetzung wäre aus Sicht einiger Hersteller jedoch eine Überarbeitung der entsprechenden Normen (siehe 1.3.1.2 und 3.2.2).
- ▶ Weitergehende Sicherheitsmechanismen, die bei einer Innenaufstellung einer Wärmepumpe mit R290 genutzt werden können, sind Unterdruck im Gehäuse, mit Sensoren gesteuerte Belüftung oder permanent laufender Ventilator (mit Zwangsabschaltung der Anlage falls dieser ausfällt). Darüber hinaus sind Gasabscheider sowie spezielle Wärmetauscher einsetzbar, um die Sicherheit zu erhöhen.

5.5 Betriebsgeräusche

- ▶ Angesichts des hohen Marktanteils von außen aufgestellten L/W-WP werden die Betriebsgeräusche als wichtiges Kriterium für die grundsätzliche Akzeptanz von Wärmepumpen genannt. Zugleich könnten Vorgaben im Rahmen des Blauen Engels als Orientierung für Behörden vor Ort dienen, falls die Schallemissionen bei einer außen aufgestellten Wärmepumpe bewertet werden müssten.
- ▶ Monoblock-Anlagen mit R290 und jene mit synthetischen Kältemitteln unterscheiden sich nach Einschätzung der Experten nicht hinsichtlich der Betriebsgeräusche.
- ▶ Die Messung auf Basis der bestehenden Norm (EN12102) wird von den meisten Branchenvertretern zwar als wichtiger Vergleichsmaßstab, jedoch als eingeschränkt aussagekräftig erachtet, weil dabei nicht der maximale Schallpegel (bei maximaler Drehzahl) erfasst wird. Alternative Prüfnormen als Vergleichsmaßstab sind derzeit allerdings nicht absehbar.
- ▶ Als zentrale Schallminderungsmaßnahmen wurden eine bessere Gehäusedämmung, die Entkoppelung von Bauteilen und vor allem ein größerer Ventilator sowie die Verringerung von Vibrationen genannt.

5.6 Bedienerfreundlichkeit, Maximierung der Lebensdauer, Service und Wartung

- ▶ Als sinnvolle Eingriffsmöglichkeit für Endkunden*Endkundinnen wird das Einstellen der Vorlauftemperatur angesehen (Empfehlung: über einen Drehregler, nicht nach Temperaturwerten), sowie eine Benachrichtigung bei Störung oder Wartungsbedarf. Des Weiteren sind diverse Funktionen zur Visualisierung des Anlagenbetriebs denkbar (z.B. Effizienzanzeige/-vergleich), weitere Eingriffsmöglichkeiten werden derzeit jedoch eher als kontraproduktiv für den optimalen Betrieb der Wärmepumpe angesehen. Die Internettauglichkeit sowie Selbstüberwachung der Anlage (mit Meldesystem bei Störungen/Wartungsbedarf) wurde daher herstellerseitig als eine mögliche Anforderung des Blauen Engels thematisiert.
- ▶ Eine Fernwartungsmöglichkeit wird ebenfalls als sinnvoll erachtet, um Anlagen (nachträglich) zu optimieren. Hierbei ist es sinnvoll verschiedene Zugriffsebenen zu gestalten: Benutzerebene - Installateurebene – Herstellerebene. Besser wären selbst lernende Regelungen, da Einrichtung, Betrieb und die Fernwartung selbst Kosten verursachen, die viele Kunden scheuen.
- ▶ Noch nicht vollständig etabliert, aber bei Fachfirmen bereits eine gelebte Praxis ist, dass präventiv Meldung des Systems an die Handwerker*innen herausgeschickt werden, damit Probleme schneller gefunden werden.
- ▶ Das Benutzerhandbuch sollte klare Empfehlungen zu Betrieb und Wartung beinhalten (darunter z.B. Installation durch geschulte Fachhandwerker, jährliche Wartung).
- ▶ Mehrere Hersteller könnten sich eine verlängerte Verfügbarkeit von Ersatzteilen als Anforderung des Blauen Engels vorstellen (Gewährleistung einer Ersatzteilverfügbarkeit von 15 Jahren nach dem letzten verkauften Gerät der Baureihe); allerdings verweisen einzelne Hersteller auf den hohen Aufwand der Lagerhaltung und der möglicherweise mangelnden langfristigen Verfügbarkeit der verbauten elektronischen Bauteile (z.B. Chips).

- ▶ Insbesondere wenn Eingriffe bzw. Wartungsarbeiten am Kältekreislauf notwendig sind, kommt bei den Herstellern speziell geschultes Service-Personal zum Einsatz, das über eine Zusatzqualifikation für den Umgang mit brennbaren A3-Kältemitteln wie R290 verfügt.
- ▶ Eine sinnvolle verlängerte Lebensdauer (u.a. durch Reparaturfähigkeit und Ersatzteilverfügbarkeit) muss ganzheitlich mit den möglichen Effizienzen von zukünftigen Anlagen sowie deren Lifecycle-Werten abgeglichen werden.

5.7 Erfolgsaussichten eines neuen Blauen Engels für Hauswärmepumpen

- ▶ Die zwingende Anforderung eines natürlichen Kältemittels wird bereits als innovatives Element eines Blauen Engels bewertet; zugleich äußern mehrere Hersteller die Befürchtung, dass durch das Umweltzeichen eventuell Wärmepumpen mit synthetischen Kältemitteln nicht mehr als klimafreundliche Technologie wahrgenommen würden. Einzelne Hersteller mit starkem Fokus auf natürliche Kältemittel erachten den Blauen Engel zudem als gute Möglichkeit, um sich von Mitbewerbern abzuheben. Auch die branchenexterne, neutrale Vergabe des Umweltzeichens wird von einzelnen Experten als Vorteil des Blauen Engels hervorgehoben.
- ▶ Im Gegensatz zu anderen Produktgruppen, die mit dem Blauen Engel ausgezeichnet werden, geht aus Herstellersicht die Entscheidung für eine Wärmepumpe nicht allein vom Endkunden aus, sondern wird meist wesentlich von dem*der Heizungsinstallateur*in bzw. dem*der Energieberater*in beeinflusst.
- ▶ Die primär auf Deutschland bezogene Ausrichtung des Blauen Engels wird von mehreren Branchenvertretern angesichts eines gesamteuropäischen Marktes kritisch gesehen. Darüber hinaus wird von einzelnen Herstellern der Bekanntheitsgrad des Blauen Engels bei Verbrauchern*Verbraucherinnen als verbesserungswürdig eingeschätzt; angesichts der Vielzahl von bestehenden Produktkennzeichnungen im Wärmepumpensektor müsse das Alleinstellungsmerkmal des Blauen Engels klar erkennbar sein (Stichwort „Labelflut“).
- ▶ Zusätzlicher Prüfaufwand bzw. weitere Zertifizierungen müssten aus Herstellersicht bei einem Blauen Engel für Hauswärmepumpen vermieden werden; vielmehr sollten die zu erbringenden Nachweise und Prüfungen möglichst an bestehende Zertifizierungen anknüpfen (insbesondere HP KEYMARK).
- ▶ Für Endkunden*Endkundinnen und somit auch für Hersteller – und dies wurde besonders betont – wäre ein Blauer Engel für Hauswärmepumpen vor allem dann interessant, wenn dieser mit einer Zusatz-/Innovationsförderung – z.B. im Rahmen der BEG – verknüpft wäre.

6 Zwischenergebnisse im Hinblick auf die Kriterienentwicklung

Eine umweltfreundliche Hauswärmepumpe muss zwei Kriterien zwingend erfüllen:

1. Sie weist im Betrieb einen möglichst geringen Energieverbrauch, also eine hohe Effizienz auf. Dieser Punkt ist und bleibt relevant, da die Stromerzeugung derzeit noch große Mengen THG-Emissionen verursacht. Wird Strom zukünftig zu höheren Anteilen aus regenerativen Energien gewonnen, nimmt die Relevanz dieses Faktors hinsichtlich THG-Emissionen zwar ab, ist aber trotzdem weiterhin positiv zu bewerten, da die verfügbare Menge regenerativ hergestellten Stroms begrenzt ist sowie die Bedarfe steigen werden und nicht zuletzt aus Gründen der Versorgungssicherheit.
2. Die Nutzung eines natürlichen Kältemittels ist als Kriterium des Blauen Engels für Hauswärmepumpen bereits festgelegt. Die Vorteile dieser Herangehensweise werden durch aktuelle Studien bestätigt. Der Einsatz natürlicher Kältemittel vermeidet nicht nur THG-Emissionen, sondern auch den Eintrag von TFA (Trifluoressigsäure) in Gewässer, der insbesondere durch Kältemittelgemische mit HFOs verursacht würde.

Zusätzliche Anforderungen an die Geräte in der Produktgruppe Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln werden so gewählt werden, dass der umweltfreundlichste Anteil der Geräte eingeschlossen wird.

Die optimale Ausgestaltung der Anforderungen an die Energieeffizienz wird im nächsten Schritt durch eine weitere Analyse der R290-Geräte am Markt im Rahmen der Kriterienentwicklung bestimmt.

Neben dem Kältemittel und der Energieeffizienz könnte der Blaue Engel auch berücksichtigen und positiv bewerten:

- ▶ Geräuschreduzierung (Innen- und Außenbereich) durch variable Anpassung der Lüftungstechnik
- ▶ Maßnahmen zur Gewährleistung eines langjährig effizienten und stabilen Wärmepumpenbetriebs, z.B. durch
- ▶ Gewährleistung von Ersatzteilverfügbarkeit und Softwareupdates
- ▶ klare Empfehlungen zu Betrieb und Wartung im Benutzerhandbuch
- ▶ sinnvolle Einstellmöglichkeit für die Nutzer*innen: Vorlauftemperatur über einen Drehregler
- ▶ Benachrichtigung der Nutzer*innen bei Störungen

Weiteres Vorgehen

Vorschläge für die Kriterien eines Blauen Engels für Hauswärmepumpen werden erarbeitet und dann Anfang 2022 in einem Stakeholderworkshop erneut mit Vertretern*Vertreterinnen der interessierten Firmen und Organisationen diskutiert. Anschließend wird der Schlussbericht veröffentlicht.

7 Quellenverzeichnis

- BAFA. (2020). Merkblatt zu den technischen Mindestanforderungen. Abgerufen von <https://www.bfee-online.de/SharedDocs/Downloads/BfEE/DE/Effizienzpolitik/zaehlerstudie.html?nn=8957388>
- BAFA. (2021). Wärmepumpen mit Prüf- / Effizienznachweis. Abgerufen von https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/beg_waermepumpen_anlagenliste.pdf?__blob=publicationFile&v=133
- Bayerisches Landesamt für Umwelt. (2020). Bodennahes Ozon und Sommersmog. Umwelt Wissen. Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- BDEW. (2020). Entwicklung des Wärmeverbrauchs in Deutschland. Basisdaten und Einflussfaktoren. Abgerufen von <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/entwicklung-des-erdgasabsatzes-deutschland/%0A>
- Behringer, D., Heydel, F., Gschrey, B., Osterheld, S., Schwarz, W., Warncke, K., Freeling, F., Nödler, K., Henne, S., Reimann, S., Blepp, M., Jörß, W., Liu, R., Ludig, S., Rüdenauer, I., Gartiser, S. (2021). Persistent degradation products of halogenated refrigerants and blowing agents in the environment: type, environmental concentrations, and fate with particular regard to new halogenated substitutes with low global warming potential. Abgerufen von <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>
- Bergmann, A., & Erhorn, H. (2017). Energieeffizienz elektrisch angetriebener Wärmepumpen: Praxisergebnisse aus dem Monitoring. IBP-Mitteilung 549: Neue Forschungsergebnisse, Kurz gefasst, Bd. 44, S. 2–3. Abgerufen von <https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/de/dokumente/ibpmitteilungen/501-550/549.pdf>
- Bjønness, K. L., Gustafsson, T., Ishikawa, J., & Maione, M. (2019). Chapter 7 Emissions of Fluorinated Substitutes for Ozone. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 3: Industrial Processes and Product Use, 3.
- BMI. (2021). ÖKOBAUDAT. Abgerufen 30. November 2021, von Ökobaudat Informationsportal Nachhaltiges Bauen website: https://www.oekobaudat.de/no_cache/datenbank/suche.html
- BMU. (2019). Umweltinformationen für Produkte und Dienstleistungen. Anforderungen - Instrumente - Beispiele (7. überarb). Abgerufen von https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/umweltinformationen_produkte_dienstleistungen.pdf
- BMWi. (2020). Richtlinie für die Bundesförderung für effiziente Gebäude. Abgerufen von https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/F/foerderrichtlinie-beg-em.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- BMWi. (2021). Richtlinie für die Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen (BEG EM). Bundesanzeiger, (September), 3–7. Abgerufen von https://www.deutschland-machtseffizient.de/KAENEf/Redaktion/DE/PDF-Anlagen/BEG/bundesfoerderung-fuer-effiziente-gebäude-einzelmassnahmen-20210916.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- Bost, M., Braunmühl, J. von, & Hirschl, B. D. (2011). Überarbeitung der Vergabegrundlagen für die Umweltzeichen „Wärmepumpen elektrisch“ (RAL-UZ 121) und „Wärmepumpen gasbetrieben“ (RAL-UZ 118).
- BWP. (2021a). Roadmap Wärmepumpe. Der Weg zur Dekarbonisierung des Gebäudesektors (S. 1–21). S. 1–21. Berlin: BWP.
- BWP. (2021b). Sachkundigenregister. Abgerufen 22. Oktober 2021, von <https://www.waermepumpenfachmann.de/>
- BWP. (2021c). Schallrechner. Abgerufen 1. Dezember 2021, von <https://www.waermepumpe.de/schallrechner/>

- BWP. (2021d). SG Ready-Datenbank. Abgerufen 22. Oktober 2021, von <https://www.waermepumpe.de/normen-technik/sg-ready/sg-ready-datenbank/>
- BWP. (2021e). SG Ready-Label. Abgerufen 22. Oktober 2021, von <https://www.waermepumpe.de/normen-technik/sg-ready>
- BWP. (2021f). Zahlen und Daten. Abgerufen 1. August 2021, von <https://www.waermepumpe.de/presse/zahlen-daten/>
- BWP. (2021g, Januar 19). Positives Signal für den Klimaschutz: 40 Prozent Wachstum bei Wärmepumpen. Abgerufen von <https://www.waermepumpe.de/presse/pressemitteilungen/details/positives-signal-fuer-den-klimaschutz-40-prozent-wachstum-bei-waermepumpen/#content>
- Campbell, J. S., Kable, S. H., & Hansen, C. S. (2021). Photodissociation of CF₃CHO provides a new source of CHF₃ (HFC-23) in the atmosphere: implications for new refrigerants. Preprint on Research Square (not completed peer review), 3, 1–12. Abgerufen von https://www.researchgate.net/publication/349087211_Photodissociation_of_CF3CHO_provides_a_new_source_of_CHF3_HFC-23_in_the_atmosphere_implications_for_new_refrigerants
- CEN Keymark. (2021a). Heat Pumpe KEYMARK Certificates. Abgerufen von <https://keymark.eu/en/products/heatpumps/certified-products>
- CEN Keymark. (2021b). Heat Pumps. A Single Certificate for a Single European Market. Abgerufen von <https://keymark.eu/en/products/heatpumps/heat-pumps>
- CEN Keymark. (2021c). Where is Heat Pump KEYMARK Recognized in Europe? Abgerufen von <https://keymark.eu/en/products/heatpumps/where-is-heat-pump-keymark-recognized>
- Christoph, E. (2002). Bilanzierung und Biomonitoring von Trifluoracetat und anderen Halogenacetaten. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades. Universität Bayreuth.
- Dankwerth, C., Methler, T., Schnabel, L., & Schossig, P. (2020). Low Charge Heat Pump Module: development and evaluation of charge reduced designs using 150g of R-290. Chillventa eSpecial. Abgerufen von https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/conference-paper/093_Fraunhofer-ISE_Chillventa-2020_1015_Low Charge Heat Pump Module.pdf
- De Graaf, D., Elsner, C., Hoffmann, G., Martens, K., Thalheim, D., & Plehn, W. (2021). Hydrofluorocarbon Emission Reduction: A Crucial Contribution to Climate Protection. Abgerufen von <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/hydrofluorocarbon-emission-reduction-a-crucial>
- EHPA. (2021a). About. Abgerufen 1. November 2021, von <https://www.ehpa.org/about/>
- EHPA. (2021b). Database. Abgerufen 1. November 2021, von <https://www.ehpa.org/nc/quality/quality-label/database/>
- EHPA. (2021c). EHPA sales data acquisition and processing methodology. Abgerufen 1. November 2021, von http://www.stats.ehpa.org/hp_sales/annex/
- EHPA. (2021d). Heat pump sales overview. Abgerufen 1. November 2021, von http://www.stats.ehpa.org/hp_sales/story_sales/
- EHPA. (2021e). Participating countries. Abgerufen 1. November 2021, von <https://www.ehpa.org/quality/quality-label/participating-countries/>
- EHPA. (2021f). Quality Label. Abgerufen 1. November 2021, von <https://www.ehpa.org/quality/quality-label/>
- EHPA. (2021g). Registered Test Centres. Abgerufen 1. November 2021, von <https://www.ehpa.org/quality/quality-label/registered-test-centres/>
- Ehrhardt, H. (2020). BWP-Branchenstudie 2021: Wie die Klimaziele erreicht werden können.

Ellis, D. A., Hanson, M. L., Sibley, P. K., Shahid, T., Fineberg, N. A., Solomon, K. R., ... Mabury, S. A. (2001). The fate and persistence of trifluoroacetic and chloroacetic acids in pond waters. *Chemosphere*, 42, 309–318.

EU. (2006). Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG. Amtsblatt der Europäischen Union, L 157, 24–86. Abgerufen von <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006L0042&from=DE>

EU. (2007). Entscheidung der Kommission vom 9. November 2007 zur Festlegung der Umweltkriterien für die Vergabe des EG-Umweltzeichens an Elektro-, Gasmotor oder Gasabsorptionswärmepumpen (2007/742/EG). Amtsblatt der Europäischen Union, L 301, 14–25. Abgerufen von <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32007D0742&from=DE>

EU. (2008a). Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen. Amtsblatt der Europäischen Union, L 353(September), 1–1355. Abgerufen von <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:353:0001:1355:de:PDF>

EU. (2008b). Verordnung (EG) Nr. 765/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. Juli 2008 über die Vorschriften für die Akkreditierung und Marktüberwachung im Zusammenhang mit der Vermarktung von Produkten. Amtsblatt der Europäischen Union, L 218, 30–47.

EU. (2009). Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte. Amtsblatt der Europäischen Union, L 285, 10–35. Abgerufen von <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:285:0010:0035:de:PDF>

EU. (2010). Verordnung Nr. 66/2010 über das Umweltzeichen. Amtsblatt der Europäischen Union, L27(April 2009), 1–19.

EU. (2011). Richtlinie 2011/65/EU des europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Juni 2011 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten. Amtsblatt der Europäischen Union, L 174, 88–110. Abgerufen von <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011L0065&from=DE>

EU. (2012). Richtlinie 2012/19/EU des europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte. Amtsblatt der Europäischen Union, L 197, 38–71. Abgerufen von <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:197:0038:0071:de:PDF>

EU. (2013a). Delegierte Verordnung (EU) Nr. 811/2013 der Kommission vom 18. Februar 2013 zur Ergänzung der Richtlinie 2010/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Energiekennzeichnung von Raumheizgeräten, Kombiheizgeräten, Verbundanlagen aus Raumheizgeräten, Temperaturreglern und Solareinrichtungen sowie von Verbundanlagen aus Kombiheizgeräten, Temperaturreglern und Solareinrichtungen. Amtsblatt der Europäischen Union, (L 239), 1–82. Abgerufen von <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013R0811&from=DE>

EU. (2013b). Delegierte Verordnung (EU) Nr. 812/2013 der Kommission vom 18. Februar 2013 zur Ergänzung der Richtlinie 2010/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Energieeffizienzkennzeichnung von Warmwasserbereitern, Warmwasserspeichern. Amtsblatt der Europäischen Union, (L 239), 83–135. Abgerufen von <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ%3AL%3A2013%3A239%3A0083%3A0135%3ADE%3APDF>

EU. (2013c). Verordnung (EU) Nr. 813/2013 der Kommission vom 2. August 2013 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 Raumheizgeräten und Kombiheizgeräten. Amtsblatt der Europäischen Union, L 239, 136–161. Abgerufen von <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013R0813&from=DE>

EU. (2013d). Verordnung (EU) Nr. 814/2013 der Kommission vom 2. August 2013 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 Warmwasserbereitern und Warmwasserspeichern. Amtsblatt der Europäischen Union, L 239, 162–183. Abgerufen von <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013R0814&from=DE>

EU. (2014a). Beschluss der Kommission vom 28. Mai 2014 zur Festlegung der Kriterien für die Vergabe des EU-Umweltzeichens für Warmwasser-Heizgeräte. Amtsblatt der Europäischen Union, 314(6), 83–103.

EU. (2014b). Richtlinie 2014/35/EU des europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung elektrischer Betriebsmittel zur Verwendung innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen auf dem Markt. Amtsblatt der Europäischen Union, L 96, 357–374. Abgerufen von <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0035&from=EN>

EU. (2014c). Richtlinie 2014/68/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Mai 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung von Druckgeräten auf dem Markt. Amtsblatt der Europäischen Union, L 189, 164–259. Abgerufen von <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0068&from=DE>

EU. (2014d). Verordnung (EU) Nr. 517/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. April 2014 über fluorierte Treibhausgase und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 842/2006. Amtsblatt der Europäischen Union, L 150, 195–230.

EU. (2017). Verordnung (EU) 2017/1369 des europäischen Parlaments und des Rates - vom 4. Juli 2017 - zur Festlegung eines Rahmens für die Energieverbrauchskennzeichnung und zur Aufhebung der Richtlinie 2010/30/ EU. Amtsblatt der Europäischen Union, L 198(4), 1–23. Abgerufen von <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017R1369&from=EN>

EU. (2018a). Mitteilung der Kommission im Rahmen der Durchführung der Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG. Amtsblatt der Europäischen Union, C 92, 1–86. Abgerufen von <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0068&from=DE>

EU. (2018b). Mitteilungen und Bekanntmachungen. Amtsblatt der Europäischen Union, C 326, 4–93.

EU. (2019a). Durchführungsbeschluss (EU) 2019/1956 vom 26 November 2019 über die harmonisierten Normen für elektrische Betriebsmittel zur Verwendung innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen und zur Unterstützung der Richtlinie 2014/35/EU des Europäischen Parlaments und des Rates. Amtsblatt der Europäischen Union, L 306, 26–34. Abgerufen von <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019D1956&from=DE>

EU. (2019b). Durchführungsbeschluss (EU) 2019/436 der Kommission vom 18. März 2019 über die harmonisierten Normen für Maschinen zur Unterstützung der Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates. Amtsblatt der Europäischen Union, L 75, 108–119. Abgerufen von <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019D0436&from=EN>

Europäische Kommission. (o. J.-a). Low voltage (LVD). Abgerufen 15. November 2021, von Internal market, Industry, Entrepreneurship and SMEs website: https://ec.europa.eu/growth/single-market/european-standards/harmonised-standards/low-voltage-lvd_en

Europäische Kommission. (o. J.-b). Machinery (MD). Abgerufen 15. November 2021, von Internal market, Industry, Entrepreneurship and SMEs website: https://ec.europa.eu/growth/single-market/european-standards/harmonised-standards/machinery-md_en

- Förster, I. D., & Vehring, K. (2018). Certification for the Heat Pump KEYMARK. The Importance of Quality in a Growing European Heat Pump Market, 8–10. Abgerufen von https://dev.dincertco.de/media/dincertco/dokumente_1/brochures/tuev-rheinland_wp_keymark-for-heat-pumps_en.pdf
- Fraunhofer ISE. (2021). Einzigartige Messkampagne zur Füllmengenreduktion von Propan-Wärmepumpen gestartet. Abgerufen von <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2021/einzigartige-messkampagne-zur-fuellmengenreduktion-von-propan-waermepumpen-gestartet.html>
- Frischknecht, R. (1999a). Umweltrelevanz natürlicher Kältemittel. Ökobilanzen von Wärmepumpen und Kälteanlagen. Anhang. Abgerufen von <http://esu-services.ch/fileadmin/download/frischknecht-1999-LCA-Kaeltemittel-Anhang.pdf>
- Frischknecht, R. (1999b). Umweltrelevanz natürlicher Kältemittel. Ökobilanzen von Wärmepumpen und Kälteanlagen. Schlussbericht.
- Germanus, J., Feja, S., Junk, M., & Hanzelmann, C. (2018). R744A, ein (fast) unbekanntes Tieftemperaturkältemittel. KI Kälte Luft Klimatechnik, 10, 66–73. Abgerufen von https://www.ki-portal.de/wp-content/uploads/2018/10/KI_10_2018_73.pdf
- Gschrey, B., Osterheld, S., & Kleinschmidt, J. (2020). Implementierung des EU-HFKW-Phase-down in Deutschland. Abgerufen von https://www.oekorecherche.de/sites/default/files/publikationen/texte_164-2020_implementierung_des_eu-hfkW-phase-down_in_deutschland.pdf
- Günther, D., Wapler, J., Helmling, S., & Miara, M. (2020). Effizienzanalyse von Wärmepumpen im EFH-Bestand auf Basis von Feldtestdaten. Abgerufen von https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/conference-paper/091_Fraunhofer-ISE_Chillventa-2020_1015_EFFIZIENZANALYSE_VON_WÄRMEPUMPEN_IM_BESTAND.pdf
- Günther, P. (2020). HFO-Kältemittel durch neue Beschränkungen bedroht. Abgerufen von cci Branchenticker website: https://cci-dialog.de/luekk_hfokaeltemittel_durch_neue_beschaenkungen_bedroht_cci_branchenticker/
- Hanslik, F., & Süß, J. (2019). Wasser als Kältemittel. In Natürliche Kältemittel – Anwendungen und Praxiserfahrungen. VDE Verlag, Offenbach, cci Dialog, Karlsruhe.
- Hermann, L., Hennig, P., Metzger, S., Köhrer, M., Pauser, L., Yanev, D., ... Knauff, M. (2019). Energiemonitoring und Informationsaustausch bei Geräten und Anlagen (Zählerstudie). Abgerufen von <https://www.bfee-online.de/SharedDocs/Downloads/BfEE/DE/Effizienzpolitik/zaehlerstudie.html?nn=8957388>
- Heubes, J., Papst, I., König, H., Usinger, J., Gschrey, B., Kimmel, T., & Schwarz, W. (2014). Kohlenwasserstoffe sicher als Kältemittel einsetzen - Entwicklung einer Strategie zum vermehrten Einsatz von Kohlenwasserstoff-Kältemitteln als Beitrag zum deutschen Klimaschutzziel unter Berücksichtigung des Energieziels 2050. Abgerufen von <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/kohlenwasserstoffe-sicher-als-kaeltemittel>
- Hodnebrog, Aamaas, B., Fuglestad, J. S., Marston, G., Myhre, G., Nielsen, C. J., ... Wallington, T. J. (2020). Updated Global Warming Potentials and Radiative Efficiencies of Halocarbons and Other Weak Atmospheric Absorbers. Reviews of Geophysics, 58(3). <https://doi.org/10.1029/2019RG000691>
- Icha, P., Dr. Lauf, T., & Kuhs, G. (2021). Entwicklung der spezifischen deutschen Strommix in Emissionen des Kohlendioxid- den Jahren 1990 - 2020. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- IEA. (2020a). Heat Pumps. Abgerufen von <https://www.iea.org/reports/heat-pumps>

- IEA. (2020b). World Energy Model Documentation. Abgerufen von https://iea.blob.core.windows.net/assets/bc4936dc-73f1-47c3-8064-0784ae6f85a3/WEM_Documentation_WEO2020.pdf
- ILT. (2021). ILT: risico's voor bodem en grondwater bij aanleg van gesloten bodemenergiesystemen. Abgerufen von <https://www.ilent.nl/actueel/nieuws/2021/05/10/ilt-risico's-voor-bodem-en-grondwater-bij-aanleg-van-gesloten-bodemenergiesystemen>
- Itard, L. (2007). Comparing environmental impacts from energy and materials embodied in buildings and used during their service life. Proceedings: Building Simulation Association 2007, 1954–1961.
- Jepsen, D., Schönheit, E., Volz, S., Wirth, Dr. O., Zimmermann, T. (2015). Versauerung von Ökosystemen. Ekodesign Kit A1.2. Ökopol. Abgerufen von https://www.ecodesignkit.de/fileadmin/user_upload/Dateien/PDFs_Themenpapiere/EcodesignKit_A1_2_Versauerung_von_Oekosystemen.pdf
- Johnson, E. P. (2011). Air-source heat pump carbon footprints: HFC impacts and comparison to other heat sources. *Energy Policy*, 39(3), 1369–1381.
- Kemna, R., van Elburg, M., van den Boorn, R., & Aarts, S. (2019). Space and combination heaters. Ecodesign and Energy Labelling. Review Study existing ecodesign & energy labelling. Review Study. Task 5 Environment and Economics (base cases, LCA and LCC). Europäische Kommission.
- Key, B. D., Howell, R. D., & Criddle, C. S. (1997). Fluorinated Organics in the Biosphere. *Environmental Science & Technology*, 31(9), 2445–2454.
- KfW. (2021a). Bundesförderung für effiziente Gebäude. Abgerufen 1. November 2021, von <https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Bundesförderung-für-effiziente-Gebäude/>
- KfW. (2021b). Bundesförderung für effiziente Gebäude – Liste der technischen FAQ - Einzelmaßnahmen (Bd. 0). Abgerufen von [https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Förderprogramme-\(Inlandsförderung\)/PDF-Dokumente/6000004864_BEG_TFAQ_EM.pdf](https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Förderprogramme-(Inlandsförderung)/PDF-Dokumente/6000004864_BEG_TFAQ_EM.pdf)
- König, H. (2017). Projekt: Lebenszyklusanalyse von Wohngebäuden. Endbericht. Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- Koronen, C., Oltersdorf, T., & Tedesco, R. (2021). Briefing: One step forward, two steps back. A deep dive into the climate impact of modern fluorinated refrigerants. Abgerufen von https://ecostandard.org/wp-content/uploads/2021/11/ECOS-briefing-on-HFO-production-and-degradation_final.pdf
- Kuijpers, L., & Peixoto, R. (2014). 2014 Report of the Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pump Technical Options Committee. Abgerufen von <http://conf.montreal-protocol.org/meeting/mop/mop-27/presession/Background Documents are available in English only/ROTC-Assessment-Report-2014.pdf>
- LAI. (2013). Leitfaden für die Verbesserung des Schutzes gegen Lärm bei stationären Geräten. 1–16. Abgerufen von https://www.lai-immissionsschutz.de/documents/leitfaden_verbesserung_schutz_gegen_laerm_bei_stat_geraete_1588594414.pdf
- Lamb, R. (2018). Low Charge, Packaged Ammonia Solutions For Small Industrial Refrigeration Applications. Abgerufen von https://www.eurammon.com/images/eurammon/attachments/2018_eurammon_star_refrigeration_robert_lamb_0.pdf
- Lange, P., Kjeldsen, U. B., Tofteng, M., Krag, A., & Lindgaard, K. (2014). The coexistence of two ecolabels: The Nordic Ecolabel and the EU Ecolable in the Nordic countries (Nordic Council of Ministers, Hrsg.).
- Laplagne, V. (2019). EHPASTATS WEBINAR. French market. AFPAC.

- Lauf, D. T., Memmler, M., Merkel, K., Pabst, J., Rother, S., Schneider, S., & Dreher, M. (2021). Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger (S. 137). S. 137. Abgerufen von http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_15_2013_emissionsbilanz_erneuerbarer_energietraeger.pdf
- Lobnig, S. (2012). Experience with R600a heat pumps installed at Danish hospital. Abgerufen von Hydrocarbons21.com website: http://hydrocarbons21.com/articles/2782/experience_with_r600a_heat_pumps_installed_at_danish_hospital
- Low, R. E. (2010). New refrigerant development - the 4th generation challenge. INEOS Fluor Ltd.
- Mauch, P. W., & Greif, S. (2021). Grundlagenstudie Wärmepumpen-Fahrplan. Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.
- Miara, M. (2021). Wie ökologisch arbeiten Wärmepumpen im Bestand? Serie „Wärmepumpen im Bestand“. Abgerufen von <https://blog.innovation4e.de/2021/03/24/wie-oekologisch-arbeiten-waermepumpen-im-bestand/>
- Miara, M., Günther, D., Kramer, T., Oltersdorf, T., & Wapler, J. (2011). Wärmepumpen Effizienz. Abgerufen von https://wp-monitoring.ise.fraunhofer.de/wp-effizienz/download/wp_effizienz_endbericht_langfassung.pdf
- Müller, M., Röhl, P. D., & Paatzsch, R. (2016). Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln. Endbericht. Umweltbundesamt.
- Nordic Ecolabelling. (2018). Nordic Ecolabelling for Heat pumps. Version 3.5.
- Nowak, T. (2019). Webinar: EHPA market report and statistics outlook 2019. Abgerufen von https://www.ehpa.org/fileadmin/red/09._Events/2019_Events/Market_and_Statistic_Webinar_2019/20190624_-_EHPA_Webinar_outlook_2019_-_Thomas_Nowak.pdf
- Nowak, T., & Westring, P. (2019). European Heat Pump Market and Statistics Report 2020. EHPA.
- Ökobaumat. (2018a). Prozess-Datensatz: Difluormethan (R32). Abgerufen 30. November 2021, von Ökobaumat Informationsportal Nachhaltiges Bauen website: <https://oekobaumat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?lang=de&uuid=d05ec06c-0443-4357-8915-ba745dcc84a5&version=20.19.120>
- Ökobaumat. (2018b). Prozess-Datensatz: Nutzung - Strom-Wärmepumpe Luft-Wasser 7kW (2/35). Abgerufen 30. November 2021, von Ökobaumat Informationsportal Nachhaltiges Bauen website: https://oekobaumat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=4607b899-9c83-4764-a621-8e79c94887ec&version=20.19.120&stock=OBD_2021_I&lang=de
- Ökobaumat. (2018c). Prozess-Datensatz: Nutzung - Strom-Wärmepumpe Sole-Wasser (0/35). Abgerufen 30. November 2021, von Ökobaumat Informationsportal Nachhaltiges Bauen website: https://oekobaumat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=3fd6d7dc-6618-42f4-b6be-f5b6f9a38763&version=20.19.120&stock=OBD_2021_I&lang=de
- Ökobaumat. (2018d). Prozess-Datensatz: Propan (R290). Abgerufen 30. November 2021, von Ökobaumat Informationsportal Nachhaltiges Bauen website: https://oekobaumat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=03517019-174a-47f4-8f28-01ed77584cb9&version=20.19.120&stock=OBD_2021_I&lang=de
- Ökobaumat. (2018e). Prozess-Datensatz: Strom-Mix-Szenario 2030; <1kV (de). Abgerufen 1. Dezember 2021, von Ökobaumat Informationsportal Nachhaltiges Bauen website: <https://www.oekobaumat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=e114e6be-30fc-4cce-9e27-d7f8232384cf&version=20.19.120>

Ökobaudat. (2018f). Prozess-Datensatz: Strom-Wärmepumpe (Sole-Wasser, Erdkollektor) 10 kW. Abgerufen 30. November 2021, von Ökobaudat Informationsportal Nachhaltiges Bauen website:

https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=3bf7183e-741e-4fb7-a32e-574e76e3e747&version=20.19.120&stock=OBD_2021_I&lang=de

Ökobaudat. (2018g). Prozess-Datensatz: Strom Wärmepumpe (Luft-Wasser) 7kW. Abgerufen 30. November 2021, von Ökobaudat Informationsportal Nachhaltiges Bauen website:

https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=efa279e8-0ac1-4883-b87c-0cb11e17d265&version=20.19.120&stock=OBD_2021_I&lang=de

Ökobaudat. (2019). Prozess-Datensatz: Kältemittel R410a. Abgerufen 30. November 2021, von Ökobaudat Informationsportal Nachhaltiges Bauen website:

<https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?lang=de&uuid=988bb7c3-0a15-4626-a6c0-0883d4ff33dd>

ÖkoZentrum NRW. (2021). Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG). Abgerufen von

<https://oekozentrum.nrw/aktuelles/detail/news/bundesfoerderung-fuer-effiziente-gebaeude-beg/>

Preiss, G. (2012, August 15). Neuer Schadenfall im Südwesten durch Geothermie. Stuttgarter Nachrichten.

Abgerufen von <https://www.stuttgarter-nachrichten.de/inhalt.bodensenkungen-neuer-schadenfall-im-suedwesten-durch-geothermie.29050066-a472-444e-96d3-cf024b951668.html>

Prognos, Öko-Institut, & Wuppertal-Institut. (2020). Klimaneutrales Deutschland.: In drei Schritten zu null Treibhausgasen bis 2050 über ein Zwischenziel von -65% im Jahr 2030 als Teil des EU-Green-Deals. Abgerufen von www.agora-energiewende.de

RAL gGmbH. (2012). Vergabegrundlage für Umweltzeichen Energiesparende Wärmepumpen RAL-UZ 118. RAL gGmbH.

RAL gGmbH. (2016). Das Umweltzeichen Raumklimageräte für den stationären Einsatz DE-UZ 204. Version 2(August). Abgerufen von <https://produktinfo.blauer-engel.de/uploads/criteriafile/de/DE-UZ 204-201608-de Kriterien-2020-01-10.pdf>

RWI. (2020). Erstellung der Anwendungsbilanzen 2020 für den Sektor der Privaten Haushalte und den Verkehrssektor in Deutschland. Abgerufen von <https://ag-energiebilanzen.de/8-0-Anwendungsbilanzen.html>

Salzburger Landesregierung. (2021). Produktdatenbank. Abgerufen 14. Dezember 2021, von <https://www.produktdatenbank-get.at/imprint.html>

Sauter, D., Hunziker, M., Schubert, M., Sperr, N., Koch, M., & Rohrer, J. (2020). L-Sol : Heizungssystem mit PVT als Quelle für eine Wärmepumpe Neuartiges System für die optimierte Nutzung von PVT und Wärmepumpe in EFH ohne Erdwärmesonde und Aussenlufteinheit. Abgerufen von

<https://www.aramis.admin.ch/Default.aspx?DocumentID=65363&Load=true>

Schieferecke, M. (2018). Wie gefährlich ist die Erdwärme? Stuttgarter Nachrichten. Abgerufen von

<https://www.stuttgarter-zeitung.de/inhalt.geothermieschaeden-in-der-erdwaermeliga-steigt-das-land-ab.35172f67-7944-491f-a29b-5ec3978a0fb1.html>

Schiffmann, J., & Weickgenannt, A. (2018). Ölfreie Radialverdichter für mehrstufige Wärmepumpen. Abgerufen von <https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=65643&Load=true>

Schuberth, J. (2021). Umgebungswärme und Wärmepumpen. Abgerufen von

<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/umgebungswaerme-waermepumpen#Effizienz>

Schuberth, J., Wachau, A., Hennig, P., Hermann, L., Reher, C., Grondy, A., & Horn, A. (2018). Minimum requirements on monitoring equipment for assessing the energy efficiency of heating , ventilation and air

conditioning products. Update on submissions from March 2018 by the Federal Environment Agency (UBA) and the Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM) on the Ecodesign Process. Abgerufen von https://www.ecoboiler-review.eu/Boilers2017-2019/downloads/20180831_UBA-BAM_Ecodesign_monitoring-equipment_HVAC-products.pdf

Simo, A., Palkowski, C., & Wachau, A. (2019, Mai 29). Proposal for the revision of the harmonised test standard EN 14825:2016, for the testing and rating of air conditioners and heat pumps at part load conditions and calculation of seasonal performance. Abgerufen von https://www.bam.de/Netzwerke/Content/DE/Downloads/Evpg/Heizen-Kuehlen-Lueften/proposal_revision_en14825_final.pdf.pdf?__blob=publicationFile

Stausholm, T. (2019). Using Air as a Refrigerant. Abgerufen 26. November 2021, von Ammonia21.com website: https://www.ammonia21.com/articles/9172/using_air_as_a_refrigerant

Stausholm, T. (2020). German Project Developing Compact Circuit for R290 Heat Pumps. Abgerufen von Hydrocarbons21.com website: http://hydrocarbons21.com/articles/9797/german_project_developing_compact_circuit_for_r290_heat_pumps?mc_cid=83c7a03b37&mc_eid=fc9d8192a7

Stratus Consulting. (2010). Analysis of Equipment and Practices in the Reclamation Industry. Draft report. Abgerufen von https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-08/documents/analysis_of_equipment_and_practices_in_the_reclamation_industry.pdf

TEAP. (1999). The implications to the Montreal Protocol of the inclusion of HFCs and PFCs in the Kyoto Protocol. Report of the TEAP HFC and PFC Task Force.

Timm, E. (2020). Kältemittel – Ein Überblick: Thermodynamische, sicherheits- und umweltrelevante Herausforderungen. Abgerufen von KI Portal: https://www.ki-portal.de/wp-content/uploads/2020/05/KI_2020_05_Wissenschaft.pdf

UBA. (2020). PFAS. Gekommen, um zu bleiben (1/2020). Abgerufen von https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/publikationen/uba_sp_pfas_web_0.pdf

UBA. (2021a). Entwicklung und Zielerreichung der Treibhausgas-Emissionen in Deutschland. Abgerufen von https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/2_abb_thg-emissionen-zielpfade-de_2021-09-03.pdf

UBA. (2021b). ProBas. Abgerufen 30. November 2021, von <https://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php#>

VdZ - Forum für Energieeffizienz. (2016). Fachregel Optimierung von Heizungsanlagen im Bestand.

Vehlow, J., & Gloel, J. (2020). Thermal destruction of (hydr)chloro- fluorocarbons and hydrofluorocarbons. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

Zill, M., Olesen, G. B., & Toulouse, E. (2020). Five years left. How ecodesign and energy labelling can decarbonise heating. ECOS.

A Kältemittel-Nomenklatur und Sicherheitsklassifizierung

A.1 ANSI/ASHRAE Standard 34-2019

Die Nomenklatur der Kältemittel ist im ANSI/ASHRAE Standard 34-2019 geregelt. Dieser gruppiert die Kältemittel nach Art des Ausgangsstoffes. Die Vergabe einer „R-Nummer“ kennzeichnet einen Stoff als anerkanntes Kältemittel.

Kältemittel-Klassifizierung nach ANSI/ASHRAE Standard 34

Reinstoffe - Gesättigte Verbindungen:

- ▶ Methan Serie (Methan und halogenierte Methanverbindungen, z.B. R23 und R32)
- ▶ Ethan Serie (Ethan und halogenierte Ethanverbindungen, z.B. R134a, R170)
- ▶ Ether (nur Dimethylether E170)
- ▶ Propan Serie (Propan und halogenierte Propanverbindungen z. B. R290)
- ▶ Cyclische Kohlenwasserstoffe (bisher nur C318 Okto-Fluor-Cyclobutan)
- ▶ Verschiedene organische Verbindungen (600er-Reihe (Kohlenwasserstoffe wie Butan, Isobutan (R600a), sauerstoffhaltige, schwefelhaltige und stickstoffhaltige organische Verbindungen)
- ▶ Anorganische Stoffe (700er und 7000er-Reihe, dazu gehören auch Ammoniak (R717), Kohlendioxid (R744), Wasser (R718) und Distickstoffoxid (R744A))

Reinstoffe - Ungesättigte organische Verbindungen

- ▶ 1000er-Reihe (dazu gehören u.a. Propylen und die HFO)

Kältemittelgemische:

- ▶ Zeotrope Gemische: 400er-Reihe (Gemische aus mehreren Komponenten, die einen Temperaturgleit aufweisen))
- ▶ Azeotrope-Gemische: 500er-Reihe (Gemische aus mehreren Komponenten, die sich beim Phasenwechsel wie ein Reinstoff verhalten)

Quelle: Timm (2020)

A.2 ISO 817:2014-05 Kältemittelklassifizierung

Für die sicherheitsrelevante Einstufung verschiedener Kältemittel ist die ISO 817:2014-05 mit den Ergänzungen 2017 und 2021 relevant. Hierauf basieren verschiedene Sicherheitsstandards für Kälteanlagen und Wärmepumpen (DIN EN 378 Teile 1-4, DIN EN 60335-2-24, -40, -89 etc. und ISO 5149; siehe auch 1.3.1.2) hinsichtlich der Einstufung der Kältemittel. Die Kältemittel werden hinsichtlich der Giftigkeit (Toxizität) und der Brennbarkeit klassifiziert und durch weitere Kennwerte gekennzeichnet (Timm, 2020).

Einstufung der Toxizität

- ▶ A: Geringere chronische Toxizität: Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) (früher MAK: Maximale Arbeitsplatzkonzentration, die ISO verweist noch auf den MAK-Wert) > 400ppm
- ▶ B: Höhere chronische Toxizität: Maximaler AGW (MAK) > 400ppm

Der AGW und der MAK-Wert sind bei „regelmäßiger Exposition des Menschen als Durchschnittswert über eine Arbeitsschicht mit in der Regel 8 Stunden und einer 5-Tage-Woche“ zu verstehen (Timm, 2020). Die ISO 817 beschreibt die häufig deutlich höheren akuten Werte u. a. durch den ATEL-Wert (Acute Toxicity Exposure Limit).

Quelle: Timm (2020)

Einstufung der Brennbarkeit:

- ▶ 1: Keine Flammausbreitung (no flame propagation)
- ▶ 2L: Gering entflammbar (lower flammability)
- ▶ 2: Entflammbar (flammable)
- ▶ 3: Höhere Entflammbarkeit (higher flammability)

Brennbarkeit ist keine Stoffeigenschaft, sie ergibt sich aus Definition und Messmethodik. Bei Anwendung anderer Standards kann die Bewertung anders ausfallen.

Quelle: Timm (2020)

Die kombinierte Betrachtung der Einstufungen von Brennbarkeit und Toxizität führt zur üblichen Einordnung gemäß Tabelle 34.

Tabelle 34: Einteilung der Kältemittel nach ISO 817:2014-05

	Gering toxisch	Erhöht toxisch
Keine Flammenausbreitung	A1	B1
Gering entflammbar	A2L	B2L
Entflammbar	A2	B2
Höhere Entflammbarkeit	A3	B3

Quelle: ISO 817:2014-05

B Überblick WP-Modelle mit R290 Kältemittel

Tabelle 35: Überblick der Wärmepumpenmodelle mit R290

Hersteller	Modell	Typ und Bauart	Pdesign_m_35 (kW)	$\eta_{s_m_35}$	Pdesign_m_55 (kW)	$\eta_{s_m_55}$	GE außen	GE innen	Kältemittel Füllmenge (kg)	Regelbarkeit
alpha innotec	LWDV 91-1/3-HDV 12-3	L/W Monoblock	10	187%	9	147%	54		1.05	modulierend
alpha innotec	LWDV 91-1/3-HSDV 12.1-3	L/W Monoblock	10	187%	9	147%	54		1.05	modulierend
alpha innotec	LWDV 91-1/3-HSDV 9M1/3	L/W Monoblock	10	187%	9	147%	54		1.05	modulierend
alpha innotec	LWD 90A-HMD	L/W Monoblock	10	150%	10	126%	62		1.17	einstufig
alpha innotec	LWD 50A-HTD	L/W Monoblock	6	163%	5	125%	57		0.95	einstufig
alpha innotec	LWD 50A/RX-HMD	L/W Monoblock	6	152%	5	125%	57		2.1	einstufig
alpha innotec	LWD 70A-HMD	L/W Monoblock	9	158%	8	127%	57		1.1	einstufig
alpha innotec	LWD 70A/RX - HMD	L/W Monoblock	9	152%	8	125%	57		2.2	einstufig
CTA	CN 9a	L/W Monoblock	10	150%	10	126%	62		1.17	einstufig

Hersteller	Modell	Typ und Bauart	P _{design_m_35} (kW)	η _{s_m_35}	P _{design_m_55} (kW)	η _{s_m_55}	GE außen	GE innen	Kältemittel Füllmenge (kg)	Regelbarkeit
CTA	CN 5a	L/W Monoblock	6.1	163%	5.4	125%	57		0.95	einstufig
CTA	CN 7a	L/W Monoblock	8.9	158%	8.3	127%	57		1.1	einstufig
Dimplex	LA 33TBS	L/W Monoblock	20	159%	18	123%	61		2.5	mehrstufig
Hautec	HWL-A 46	L/W Monoblock	9.2	186%	8.4	143%	52			
Hoval	Belaria pro comfort (15)	L/W Monoblock	12	220%	11	161%	50		2.8	modulierend
Hoval	Belaria pro comfort (13)	L/W Monoblock	10	202%	10	154%	51		1.8	modulierend
Hoval	Belaria pro compact (13/100/300)	L/W Monoblock	10	202%	10	154%	51		1.8	modulierend
Hoval	Belaria pro comfort (8)	L/W Monoblock	8	206%	7	153%	46		1.2	modulierend
IDM	iPump ALM 2-8	L/W Monoblock	8	207%	7	154%	46		1.2	modulierend
iDM	AERO ALM 6-15	L/W Monoblock	12	220%	11	161%	50			modulierend
iDM	AERO ALM 4-12	L/W Monoblock	10	203%	10	154%	51		1.8	modulierend

Hersteller	Modell	Typ und Bauart	Pdesign_m_35 (kW)	$\eta_{s_m_35}$	Pdesign_m_55 (kW)	$\eta_{s_m_55}$	GE außen	GE innen	Kältemittel Füllmenge (kg)	Regelbarkeit
LAMBDA	EU13L	L/W Monoblock	12	227%	12	180%	44		1.3	modulierend
LAMBDA	EU08L	L/W Monoblock	8	226%	8	179%	42		1.1	modulierend
Vaillant	aroTHERM plus VWL 125/6 A 400V	L/W Monoblock	13	195%	12	147%	59		1.3	modulierend
Vaillant	aroTHERM plus mit uniTOWER VWL 125/6 A mit VIH QW 190/6 E	L/W Monoblock	13	190%	12	143%	59		1.3	modulierend
Vaillant	aroTHERM plus VWL 55/6 A 230V	L/W Monoblock	5	183%	5	130%	54		0.6	modulierend
Vaillant	aroTHERM plus mit uniTOWER VWL 75/6 A 230V mit VIH QW 190/6 E	L/W Monoblock	6	179%	6	128%	55		1.3	modulierend
Vaillant	aroTHERM plus VWL 35/6 A 230V	L/W Monoblock	4	177%	4	124%	54		0.6	modulierend
Vaillant	aroTHERM plus mit uniTOWER VWL 55/6 A 230V mit VIH QW 190/6 E	L/W Monoblock	5	176%	5	123%	54		0.6	modulierend
Vaillant	aroTHERM plus mit uniTOWER VWL 35/6 A 230V mit VIH QW 190/6 E	L/W Monoblock	4.2	172%	4.2	118%	54		0.6	modulierend
Vaillant	aroTHERM plus VWL 105/6 A	L/W Monoblock	9	198%	9	143%	59		1.3	modulierend
Vaillant	aroTHERM plus mit uniTOWER VWL 105/6 A mit VIH QW 190/6 E	L/W Monoblock	8.9	192%	9.1	138%	59		1.3	modulierend

Hersteller	Modell	Typ und Bauart	Pdesign_m_35 (kW)	$\eta_{s_m_35}$	Pdesign_m_55 (kW)	$\eta_{s_m_55}$	GE außen	GE innen	Kältemittel Füllmenge (kg)	Regelbarkeit
Vaillant	aroTHERM plus VWL 75/6 A 230V	L/W Monoblock	7	184%	6	134%	55		0.9	modulierend
Wolf	CHA - 07/400V	L/W Monoblock	6	194%	6	148%	52		0.9	modulierend
Wolf	CHA - 10/400V	L/W Monoblock	8	191%	8	141%	53		0.9	modulierend
Heliotherm	SNTM-S-3-10	S/W Außen-aufstellung	10	245%	10	161%		0	1.8	modulierend
Heliotherm	SNTM-S-5-15	S/W Außen-aufstellung	15	252%	15	162%		0	2.3	modulierend
Hautech	H-HCS-PN 30	S/W Innen-aufstellung	10.5	217%	10.5	143%		42	0.87	modulierend
Hautech	H-HCS-PN 38	S/W Innen-aufstellung	12.5	216%	12.5	143%		42	0.98	modulierend
Hautech	H-HCS-PN 45	S/W Innen-aufstellung	14.7	208%	14.7	143%		42	0.99	modulierend
Hautech	H-HCS-PN 15	S/W Innen-aufstellung	5.2	193%	5.2	143%		42	0.6	modulierend
Hautech	H-HCS-PN 26	S/W Innen-aufstellung	9.2	219%	9.2	143%		42	0.76	modulierend
Hautech	H-HCS-PN 21	S/W Innen-aufstellung	7.4	217%	7.4	143%		42	0.62	modulierend

Hersteller	Modell	Typ und Bauart	P _{design_m_35} (kW)	$\eta_{s_m_35}$	P _{design_m_55} (kW)	$\eta_{s_m_55}$	GE außen	GE innen	Kältemittel Füllmenge (kg)	Regelbarkeit
Hautec	H-HCW-PN 26	W/W Innen-aufstellung	12.2	291%	11	176%		42	0.87	einstufig
Hautec	H-HCW-PN 21	W/W Innen-aufstellung	9.9	287%	8.7	169%		42	0.67	einstufig
Hautec	H-HCW-PN 30	W/W Innen-aufstellung	14	282%	13.23	174%		42	0.98	einstufig
Hautec	H-HCW-PN 38	W/W Innen-aufstellung	16.7	279%	14.94	167%		42	1.09	einstufig
Hautec	H-HCW-PN 45	W/W Innen-aufstellung	18.6	271%	17.01	171%		42	1.14	einstufig
Hautec	H-HCW-PN 15	W/W Innen-aufstellung	6.9	250%	6.33	172%		42	0.6	einstufig

Quelle: Herstellerdatenblätter