CLIMATE CHANGE
25/2014

Nachhaltige Kälteversorgung in Deutschland an den Beispielen Gebäudeklimatisierung und Industrie

Für Mensch & Umwelt

Umwelt Bundesamt

CLIMATE CHANGE 25/2014

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 3710 41 115
UBA-FB 001939

Nachhaltige Kälteversorgung in Deutschland an den Beispielen Gebäudeklimatisierung und Industrie

von

Carsten Heinrich, Sebastian Wittig, Peter Albring, Lutz Richter, Mathias Safarik, Ursula Böhm, Andreas Hantsch
Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden gGmbH, Dresden

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

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

/umweltbundesamt.de
/umweltbundesamt

Durchführung der Studie:
Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden gGmbH
Bertolt-Brecht-Allee 20
01309 Dresden

Abschlussdatum:
Januar 2014

Redaktion:
Fachgebiet III 1.4 Stoffbezogene Produktfragen
Daniel de Graaf

Publikationen als pdf:
http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/nachhaltige-kaelteversorgung-in-deutschland-an-den

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Juli 2014

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit unter dem Förderkennzeichen 3710 41 115 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung

Die Kältetechnik in Deutschland weist insgesamt einen Anteil am Elektroenergiebedarf von ca. 14 % auf und ist für etwa 5 % der direkten und indirekten Treibhausgasemissionen verantwortlich. Angesichts der nationalen Klimaschutzziele verdeutlichen diese Zahlen den Handlungsbedarf zur Erhöhung der Klimafreundlichkeit in der Klima- und Kältetechnik.

Die Studie untersucht Möglichkeiten zur Steigerung der Klimafreundlichkeit der Kältebereitstellung in den Anwendungsgebieten Gebäudeklimatisierung und Industriekälte. Ausgangspunkt ist eine detaillierte Analyse des Kältebedarfs in den einzelnen Anwendungsbranchen sowie eine Charakterisierung der eingesetzten Kühltechniken. Hierauf aufbauend werden für eine Auswahl an Systemen für die Gebäudeklimatisierung sowie die Industriekälte mittels ganzjähriger Betriebssimulationen Energiebedarf, Treibhausgas-Emissionen und Kosten berechnet und bewertet. Weiter werden die Potenziale zur Substitution von Kompressionskältesystemen durch wärmegetriebene Kältesysteme anhand verschiedener Randbedingungen ermittelt. Zum Abschluss wird das Marktpotenzial klimafreundlicher Kühltechniken untersucht und Empfehlungen zur Steigerung des Marktpotenzials gegeben.

Abstract

The refrigeration technology exhibits a share of approx. 14 % of the total electrical energy demand in Germany and it is responsible for approx. 5 % of the direct and indirect green house gas emissions. Regarding the national climate protection objectives, these numbers illustrate the requirement for action in order to increase the climate-friendliness of air handling and refrigeration technologies.

The study determines possibilities to maximize the climate-friendliness of refrigeration supply in the field of building air conditioning and industrial refrigeration systems. It is based on a detailed analysis of the refrigeration needs of different industrial sectors and a characterization of the cooling techniques in use. Energy demand, greenhouse gas emissions and costs are calculated and evaluated for a selection of building air conditioning and industrial refrigeration systems. A year-long simulation of the operating refrigeration systems provids the results needed for the calculation. With the help of various boundary conditions the study identifies the replacement potential of compression type refrigeration systems with thermally-driven refrigeration systems. Conclusively, the market potential of climate-friendly refrigeration systems is evaluated and recommendations to increase that potential are given.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Abkürzungen

1 Zusammenfassung 24

1.1 Nutz-, Endenergiebedarf und Klimarelevanz der Kältetechnik 24

1.2 Bewertung verschiedener Kälteerzeugungstechniken 28

1.3 Substitution von Kompressionskältesystemen durch wärmegetriebene Verfahren 36

1.4 Hemmnisse und Handlungsempfehlungen 39

2 Summary 41

2.1 Net and final energy demand, and relevance for the climate of refrigeration technology 41

2.2 Evaluation of various techniques to produce coldness 44

2.3 Substitution of compression type refrigeration by heat-driven systems 49

2.4 Barriers and recommendations 51

3 Einleitung 54

4 Definition von Kenngrößen und Kennzahlen – Eingrenzung der Bereiche 56

4.1 Definition und Eingrenzung der untersuchten Branchenbereiche 56

4.1.1 Industriekälte 56

4.1.2 Gebäudeklimatisierung 56

4.2 Definition von Kenngrößen und Kennzahlen 57

4.2.1 Primärenergiebedarf 57

4.2.2 Primärenergiefaktoren 57

4.2.3 Endenergiebedarf 58

4.2.4 Nutzenergiebedarf 58

4.2.5 Kühl- bzw. Kälteleistungsbedarf 59

4.2.6 Kühl- bzw. Kälteenergiebedarf 59

4.2.7 COP und EER 59

4.2.8 Jahresarbeitszahl (SEER) 59

4.2.9 Wärmeverhältnis 59

4.2.10 Emissionsfaktoren der Strom- und Wärmeerzeugung 59

4.2.11 Treibhauspotenzial von Kältemitteln (GWP) 63
4.2.12 TEWI....64
5 Energieverbrauch durch Klimatisierung von Nichtwohngebäuden und Prozesskältebedarf in Industrie und produzierendem Gewerbe 65
5.1 Vorbetrachtungen 65
5.2 Methodik....65
5.3 Datenquellen....67
5.3.1 Preuß: Energiebedarf für Kältetechnik in Deutschland - 2011....67
5.3.2 DKV Statusbericht 22 – Energiebedarf für die technische Erzeugung von Kälte - 2002 68
5.3.3 Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen - 2008....68
5.3.4 AG Energiebilanzen e.V. - 2011....68
5.3.5 ASUE - Absorptionskälteanlagen - Grundlagen und Referenzen - 1995....68
5.4 Industriekälte....69
5.4.1 Bergbau, Gewinnung von Steinen und Erden (nur Steinkohleabbau)....69
5.4.2 Papier- und Zellstoffindustrie....69
5.4.3 Druckindustrie....70
5.4.4 Chemieindustrie (ohne Luft- und Gasverflüssigung)....71
5.4.5 Chemieindustrie – Luft- und Gasverflüssigung....71
5.4.6 Pharmazeutische Industrie....73
5.4.7 Kunststoff- und Gummiindustrie....73
5.4.8 Bau- und Baustoffindustrie....74
5.4.9 Elektro- und Elektronikindustrie....74
5.4.10 Fahrzeugindustrie....75
5.4.11 Maschinenbau....75
5.4.12 Kompressoren und Druckluftanlagen....76
5.4.13 Prozesskälte (Flüssigkeitskühlsätze) für industrielle Anwendungen....76
5.4.14 Schaltschrankkühlung....77
5.5 Nahrungsmittelherstellung....77
5.5.1 Nahrungsmittelindustrie....77
5.5.2 Milchviehbetriebe....79
5.6 Gebäudeklimatisierung....79
5.7 Darstellung der Ergebnisse....80
6 Marktübersicht klimafreundlicher Kühltechniken....84

6.1 Einordnung von Klimasystemen und RLT-Anlagen 84
6.2 Kompressionskälteanlagen....88
6.2.1 Vergleich von Kältemitteln....88
6.2.2 Kompressionskälteanlagen – Verdichter für natürliche Kältemittel....93
6.2.3 Kompressionskälteanlagen – Kaltwassersätze....95
6.2.4 Ausgeführte Kälteanlagen mit natürlichen Kältemitteln....96
6.3 Wärmegetriebener Kälteerzeugungssysteme (Ab- und Adsorptionskälteanlagen)....100
6.3.1 Geschlossene Verfahren....100
6.3.1.1 Arbeitsstoffpaare....101
6.3.1.2 Schaltungsvarianten von Absorptionskälteanlagen....103
6.3.1.3 Marktübersicht Ab- und Adsorptionskälteanlagen....104
6.3.1.4 Anwendungsbeispiele für Absorptionskältemaschinen in Industrie und Gebäudeklimatisierung....105
6.3.2 Offene Verfahren....107
7 Vergleichende ökologische und ökonomische Bewertung ausgewählter Systeme....109
7.1 Einleitung und Herangehensweise....109
7.2 Berechnungsgrundlagen....110
7.2.1 Energiebedarf....110
7.2.2 TEWI....110
7.2.2.1 Direkter TEWI-Anteil – Leckage- und Entsorgungsverluste....110
7.2.2.2 Direkter TEWI-Anteil – GWP-Werte....111
7.2.2.3 Indirekter TEWI-Anteil....112
7.2.3 Kosten der Kältesysteme....112
7.3 Gebäudeklimatisierung....116
7.3.1 Ausgewählte Kältesysteme....116
7.3.1.1 Variante 1: AKM – System mit solargetriebener Absorptionskältemaschine....116
7.3.1.2 Variante 2: VRF – Multi-Split-VRF-System....117
7.3.1.3 Variante 3: KWS – Kaltwassersatz betrieben mit Kompressionskältemaschine....118
7.3.1.4 Variante 4: RLT – Raumlufttechnischen Anlage mit DEC-System unter Nutzung von BHKW-Abwärme....120
7.3.2 Modellierung....121
7.3.2.1 Gebäudemodell....121

7.3.2.2 Kältesysteme ... 125
7.3.3 Ergebnisse ... 126
7.3.3.1 Behaglichkeit ... 126
7.3.3.2 Energiebedarf ... 128
7.3.3.3 TEWI-Berechnungen ... 132
7.3.3.4 Kosten Kältesysteme ... 133
7.3.4 Ergebnisdiskussion Einzelsysteme ... 136
7.3.4.1 Variante 1: AKM - Absorptionskälteanlagen mit Kühldecken ... 136
7.3.4.2 Variante 2: VRF – Multi-Split-VRF-System ... 138
7.3.4.3 Variante 3: KWS – Kaltwassersatz ... 141
7.3.4.4 Variante 4: RLT - Raumlufttechnische Anlage mit DEC-System ... 144
7.4 Industriekältebereitstellung ... 146
7.4.1 Ausgewählte Kältesysteme ... 146
7.4.1.1 Variante 5: KWS – Kaltwassersatz ... 146
7.4.1.2 Variante 6: AKM – BHKW-abwärmegetriebene Absorptionskältemaschine ... 146
7.4.1.3 Variante 7: Direkt Verd. – System mit Direktverdampfung ... 147
7.4.2 Modellierung ... 148
7.4.2.1 Modell des Industriekälteverbrauchers ... 148
7.4.2.2 Kältesysteme ... 148
7.4.3 Ergebnisse ... 148
7.4.3.1 Energiebedarf ... 148
7.4.3.2 TEWI ... 150
7.4.3.3 Kosten Kältesysteme ... 152
7.4.4 Ergebnisdiskussion Einzelsysteme ... 153
7.5 Schlussfolgerungen ... 156
7.5.1 Gebäudeklimatisierung ... 156
7.5.2 Industriekältebereitstellung ... 156
7.5.3 Allgemein ... 157
8 Substitution von Kälteerzeugungssystemen durch wärmegetriebene Systeme (Szenarien) ... 159
8.1 Potenzial - Nutzung von vorhandener Abwärme zur Kälteerzeugung ... 160
8.2 Potenzial - Einsatz von Erdgas-betriebenen KWK-Anlagen ... 165
8.3 Diskussion der Potenziale ... 172

9 Verbesserung des Marktpotenzials klimafreundlicher Kühltechniken 176
9.1 Allgemeine Faktoren und Anlagenkonzepte 176
9.1.1 Verkaufssektor 177
9.1.2 Fehlende Sensibilität 178
9.1.3 Gesetzliche Vorgaben 179
9.1.4 Investitionsvermarktung – Energieeinspar-Contracting 181
9.1.5 Pilotprojekte – Öffentliche Beschaffung 182
9.2 Kälte- und Klimaanlagen mit natürlichen Kältemitteln 183
9.2.1 Sicherheitstechnische Hemmnisse und Einschränkungen durch gesetzliche Reglungen 183
9.2.2 Anreize zur Anwendung natürlicher Kältemittel – Einschränkungen zur Anwendung von HFKW-Kältemitteln 188
9.2.3 Anwendungstechnische Hindernisse 193
9.2.4 Technische Hindernisse 197
9.2.5 Wirtschaftliche Hindernisse 198
9.3 Ab- und Adsorptionskälteanlagen 203
9.3.1 Sicherheitstechnische Hemmnisse 203
9.3.2 Anwendungstechnische Hemmnisse 204
9.3.3 Wirtschaftliche Hemmnisse 206
9.4 Zusammenfassung der Handlungsempfehlungen 207
9.4.1 Gesetzliche Regelungen 207
9.4.2 Forschungsförderung – Schwerpunkte 208
9.4.3 Förderung der Wirtschaftlichkeit 209
10 Quellenverzeichnis 210
11 Anlagen 217
11.1 Leckraten 217
11.1.1 Feldtests an Gewerbekälteanlagen 217
11.1.2 FKT-Stufenplan 218
11.2 Details zur Modellierung von Kältesystemen 219
11.2.1 Kältesysteme der Gebäudeklimatisierung 219
11.2.2 Kältesysteme der Industriekälteversorgung 222

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anteil am Elektroendenergiebedarf der Kältetechnik nach Branchen 25

Abbildung 2: Nutz- und Endenergiebedarf der Kälteerzeugung der betrachteten Anwendungen.....26

Abbildung 3: TEWI-Betrachtung für verschiedene Kälte-Systeme – Unterteilung in direkte und indirekte TEWI-Anteile (die Antriebswärme wird mit verschiedenen Allokationsmethoden berücksichtigt – siehe Abschnitt 4.2.10).....31

Abbildung 4: Jahresgesamtkosten untersuchter Kältesysteme für den Bereich Gebäudeklimatisierung – für die Betriebskosten ist jeweils ein Mittelwert für alle Energiekosten- und Klimaszenarien angegeben. Das Spektrum der Betriebskosten - verursacht durch die Betrachtung verschiedener Kostenszenarien – wir durch die Fehlerbalken ersichtlich. 32

Abbildung 5: TEWI unterschiedlicher Industriekältesysteme unter unterschiedlichen Klimaszenarien 34

Abbildung 6 : Jahresgesamtkosten untersuchter Kältesysteme für den Bereich Industriekälte – für die Betriebskosten ist jeweils ein Mittelwert zu allen Kosten- und Klimaszenarien angegeben. Das Spektrum der Betriebskosten - verursacht durch die Betrachtung verschiedener Kostenszenarien – wir durch die Fehlerbalken ersichtlich.....35

Abbildung 7: Potenziale zur Kältebedarfsdeckung mit wärmegetriebenen Kälteerzeugungsverfahren 37

Abbildung 8: Elektroendenergieeinsparpotenziale durch den Einsatz von wärmegetriebenen Kälteerzeugungsverfahren (Stromeigenbedarf für Pumpen und Rückkühlung wurde berücksichtigt) 38

Abbildung 9: Indirekte TEWI-Minderungspotenziale durch den Einsatz von wärmegetriebenen Kälteerzeugungsverfahren (Stromeigenbedarf für Pumpen und Rückkühlung wurde berücksichtigt) 38

Abbildung 10: Zeitlicher Verlauf der geplanten Einschränkungen der HFKW-Mengen (quantifiziert über CO2-Äquivalent) durch den Vorschlag zur EU-F-Gase-Verordnung.....39

Figure 11: Share of refrigeration electrical energy demand of various industrial sectors 42

Figure 12: Cooling demand and final energy demand of refrigeration of particular sectors 43

Figure 13: TEWI considerations for various refrigeration systems; itemised by direct and indirect TEWI shares (driving heat given by different allocation methods; see section 4.2.10).....46

Figure 14: Final annual costs for air conditioning systems; working costs are are given by the mean value for different scenarios. Their variability is indicated by error bars. 47

Figure 15: TEWI of industrial refrigeration systems and various climate scenarios 48

Figure 16 : Final annual costs of industrial refrigeration working costs are are given by the mean value for different scenarios. Their variability is indicated by error bars. 49

Figure 17: Potentials for covering cooling demand by means of heat-driven refrigeration techniques 50

Figure 18: Potentials to save electrical energy by means of heat-driven refrigeration systems (auxiliary energy of pumps and cooler are taken into account)....51

Figure 19: Indirect TEWI reduction potentials by means of head-driven refrigeration systems (auxiliary energy of pumps and cooler are taken into account)....51

Figure 20: Temporal development of the planned limitation of HFC amount (defined by CO2-equivalent) by EU decree on fluorinated gases....52

Abbildung 21:Spezifische C02-Emissionen der Wärme aus KWK-Anlagen nach unterschiedlichen Allokationsmethoden....60

Abbildung 22:Verdrängungsstrommix bei KWK-Stromeinspeisung 61

Abbildung 23:Elektrische Wirkungsgrade von Erdgas-BHKW 61

Abbildung 24:KWK-Stromerzeugung nach Anlagentypen (Quelle: Öko-Institut via 62

Abbildung 25: Vergleich der GWP-Werte verschiedener Kältemittel sowie deren sicherheitstechnische Einstufung nach DIN EN 378 64

Abbildung 26:Gruppierung des Kälte- und Energiebedarfs – Nahrungsmittelindustrie nach VDMA Studie 66

Abbildung 27: Untergruppierung der Nahrungsmittelindustrie entsprechend Industriezweigen 67

Abbildung 28: RI-Schaltbild (links) und Prozess im T-s-Diagramm (rechts) der Luftzerlegung mit Entspannungsmaschine (Jungnickel; Agsten; Kraus 1985)....73

Abbildung 29:Prozesskühlung mit Flüssigkeitskühlsätzen – Umsatz der Hersteller nach Kundenbranchen (Guntram Preuß 2011) 77

Abbildung 30: Entwicklung der installierten Kälteleistung im Klimakältebereich (Ecodesign 2008)....80

Abbildung 31: Entwicklung der Anzahl der installierten Klimageräte (Ecodesign 2008) 80

Abbildung 32:Kältebedarf (Nutzenergie) der betrachteten Branchen 81

Abbildung 33: Kältebedarf (Nutzenergie) und hierfür benötigter elektrischer und thermischer Endenergiebedarf der betrachteten Anwendungsgebiete....81

Abbildung 34: Systematik von RLT-Anlagen in Nichtwohngebäuden 84

Abbildung 35:Klassifizierung von Teil-Klimaanlagen (nur Kühlen) 86

Abbildung 36: Einteilung der thermischen Kälteerzeugungsverfahren 87

Abbildung 37:Drucklagen unterschiedlicher Kältemittel (natürliche KM (blau), HFKW (rot), ungesättigte HFKW (orange)) 88

Abbildung 38: Kritische Temperaturen und Drücke unterschiedlicher Kältemittel (natürliche KM (blauer Rahmen), HFKW (roter Rahmen), ungesättigte HFKW (oranger Rahmen)) 89

Abbildung 39: Sauggasvolumenströme bezogen auf eine Kälteleistung von 1 kW in Abhängigkeit der Verdampfungstemperatur 89

Abbildung 40: Druckverhältnis zwischen Kondensations- und Verdampfungsdruck in Abhängigkeit der Verdampfungstemperatur bei einer Kondensationstemperatur von 35 °C 89

Abbildung 41: Kreisprozess mit einstufiger Verdichtung zur Berechnung der Prozesseffizienz 90

Abbildung 42: Leistungszahlen für einstufige Prozesse unterschiedlicher Kältemittel 91

Abbildung 43:Relative Leistungszahlen einstufiger Prozesse unterschiedlicher Kältemittel im Vergleich zu R134a 91

Abbildung 44: Zweistufiger Verdichtungsprozess mit Zwischenkühlung 92

Abbildung 45: Leistungszahlen für zweistufigen Prozess mit Zwischenkühlung für unterschiedliche Kältemittel 93

Abbildung 46: Relative Leistungszahlen zweistufiger Prozesse mit Zwischenkühlung im Vergleich zu einem einstufigen Prozess mit R134a 93

Abbildung 47:Kälteleistungsbereich verfügbarer Verdichter für das Kältemittel R744 (CO2) (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) 94

Abbildung 48:Kälteleistungsbereich verfügbarer Verdichter für das Kältemittel R717 (NH3) (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) 94

Abbildung 49: Kälteleistungsbereich verfügbarer Verdichter für reine Kohlenwasserstoffe - R290 (Propan) und R1270 (Propen) (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) 94

Abbildung 50:Kälteleistungsbereich verfügbarer Kaltwassersätze mit natürlichen Kältemittel (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) 95

Abbildung 51:Anteil der installierten Kälteleistungen nach verwendetem natürlichen Kältemittel (bezogen auf die in Tabelle 11 genannten Anlagen) 99

Abbildung 52:Anteil der installierten Kälteleistungen mit natürlichen Kältemitteln nach Anwendung (bezogen auf die in Tabelle 11 genannten Anlagen) 99

Abbildung 53:Anteil der installierten Kälteleistungen mit natürlichen Kältemitteln nach Anwendungen im Bereich der Nahrungsmittelherstellung Anwendung (bezogen auf die in Tabelle 11 genannten Anlagen) 99

Abbildung 54: Prozessschaltbild im log p-(1/T)-Diagramm einer Kompressionskälteanlage (links) und einer Absorptionskälteanlage (rechts) ... 100

Abbildung 55:Erreichbare Wärmeverhältnisse in Abhängigkeit der Kälteträgeraustrittstemperatur und des Arbeitsstoffpaares ... 102

Abbildung 56:Zusammenhang zwischen Heizmedien- und Kälteträgertemperatur ... 102

Abbildung 57:Schaltungsvarianten unterschiedlicher Kreisprozesse von Sorptionskälteanlagen ... 103

Abbildung 58:Darstellung von Effect-stufigen Absorptionskreisprozessvarianten im log p-(-1/T)-Diagramm ... 103

Abbildung 59:links - einstufige Wasser/Lithiumbromid-AKM der Firma EAW Westenfeld, Kälteleistung: 80 kW ... 104

Abbildung 60: Kälteleistungsbereich verfügbarer einstufiger Ab- und Adsorptionskälteanlagen (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) ... 105

Abbildung 61: Kälteleistungsbereich verfügbarer zweistufiger (double effect) Absorptionskälteanlagen (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) ... 105

Abbildung 62:Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung mit BHKW (linkes Bild, rechter Bildteil) und Absorptionskältemaschine (linkes Bild, linker Teil) zur Klimatisierung eines gewerblichen Gebäudes (rechtes Bild) (Weidner 2008) ... 106

Abbildung 63:Autarkes Energieversorgungssystem mit hocheffizienter KWKK im Energieversorgungszentrum der Globalfoundries-Fabrik (ehemals AMD) in Dresden (Brinckmann 2008) ... 107

Abbildung 64:Verfahrensbeispiele zur sorptionsgestützten Gebäudeklimatisierung - links: Feststoffverfahren, rechts: Verfahren mit flüssigen Sorptionsmittel ... 108

Abbildung 65: Absolute Luftfeuchtigkeit und Temperatur der Klimaregionen und Klimaszenarien im Jahresverlauf ... 109

Abbildung 66: Beispiele für Kosten und Kostenfunktionen zu Kompressionskälteanlagen (IUTA 2002) ... 113

Abbildung 67: RI-Schaltbild der Variante 1 - Solargetriebes Absorptionssystem ... 117

Abbildung 68:R-I-Schema eines Split-Klima-Systems ... 118

Abbildung 69:R-I-Schema des Kaltwassersatz-Modells mit Kälteübergabe durch Luft-Konvektoren ... 119

Abbildung 70:R-I-Schema des Kältesystems mit Wasser als Kältemittel (R718) ... 119

Abbildung 71:R-I-Schema des Kaltwassersatz-Modells mit Kaltwasserspeicher ... 120

Abbildung 72:R-I-Schema der RLT-Anlage mit sorptionsgestützter Klimatisierung ... 121

Abbildung 73:Verlauf der Inneren Lasten an einem Büroarbeitstag (Mo. – Fr.) ... 122

Abbildung 74:Aufschlüsselung der akkumulierten Wärmeströme (betrachtete Büroetage für eine warme Sommerwoche, FM) ... 124

Abbildung 75: Überschreitungshäufigkeit der Soll-Raumtemperatur für die verschiedenen Kältesysteme und klimatische Bedingungen (KWK – Kraft-Wärme-Kopplung / Fernwärmeunterstützung) 127

Abbildung 76:Überschreitungshäufigkeit der absoluten Luftfeuchtigkeit (ALF) von 11,5 g/kg für die verschiedenen Kältesysteme und Klimaszenarien (KWK – Kraft-Wärme-Kopplung / Fernwärmeunterstützung) 128

Abbildung 77: Endenergiebedarf berechneter Kältesysteme im Bereich Gebäudeklimatisierung – Zusammenstellung (KWK – Kraft-Wärme-Kopplung / Fernwärmeunterstützung) 130

Abbildung 78: Primärenergiebedarf – Zusammenstellung (KWK – Kraft-Wärme-Kopplung / Fernwärmeunterstützung, Sp – inkl. Kaltwasserspeicher) 130

Abbildung 79:Auskondensierte Wassermenge sowie zur latenten und sensiblen Abkühlung eingesetzter Kälte für die verschiedenen Systemvarianten und Klimazonen 131

Abbildung 80: Nutzen und Aufwand einer gezielten Belüftung des Gebäudes bei Nacht (FE). 132

Abbildung 81:TEWI-Betrachtung für verschiedene Kälte-Systeme – Unterteilung in direkte und indirekte TEWI-Anteile (die verschiedenen Allokationsmethoden für die Bewertung der Wärme sind in Abschnitt 4.2.10 (ab S. 33) aufgeführt) 133

Abbildung 82: Jahresgesamtkosten untersuchter Kältesysteme für den Bereich Gebäudeklimatisierung – Für die Betriebskosten ist jeweils ein Mittelwert für alle Energiekosten- und Klimaszenarien angegeben. Das Spektrum der Betriebskosten - generiert durch die Betrachtung verschiedener Kostenszenarien – wir durch die Fehlerbalken ersichtlich. 134

Abbildung 83:Zusammensetzung der Investitionskosten der verschiedenen Kältesysteme 135

Abbildung 84: Zusammensetzung der Betriebskosten für die verschiedenen Kostenszenarien (Klima: FM) 136

Abbildung 85: Solarer Deckungsgrad und Kühlbedarfsdeckungsgrad für unterschiedliche Systemkonfigurationen mit Absoprtionskälteanlage 137

Abbildung 86: Jahresarbeitszahl bezogen auf Wärme- und Elektroenergiebedarf für verschiedene Systemkonfigurationen mit Absorptionskälteanlage 138

Abbildung 87: Häufigkeitsverteilung von Leistungsstufen des VRF-Systems für erzeugte Kälte (Betrachtungszeitraum entspricht nur dem Anlagenbetrieb, Klimaszenario: FM) 139

Abbildung 88: Aufteilung der erzeugten Kälte sowie der mittleren Leistungszahl bezogen auf die erzeugte Kälte auf die Leistungsstufen des VRF-Systems (Klimaszenario: FM) 140

Abbildung 89: Häufigkeitsverteilung des EER des VRF-Systems über die Betriebszeit (Klimaszenario: FM) 140

Abbildung 90: TEWI für VRF-Systeme mit dem Kältemittel R410A in Abhängigkeit von der Leckrate 141

Abbildung 91:Berechneter Einfluss verschiedener Kältemittel auf die energetische Effizienz des Kaltwassersatz-Systems 142

Abbildung 92:Marktübersicht zur Leistungszahl EER (bei Nennkälteleistung) für luft- und wassergekühlte Kaltwassersätze bei Verwendung verschiedener Kältemittel und Nennkälteleistungen (Quelle: Eurovent, verschiedene Hersteller) 143

Abbildung 93:Relativer Vergleich der Anlageneffizienz für den Einsatz verschiedener Kältemittel abgeleitet aus der Marktübersicht (vgl. Abbildung 92). 144

Abbildung 94:TEWI-Betrachtung für Kaltwassersatz mit unterschiedlichen Kältemitteln für das Klimaszenario Frankfurt mittleres Jahr (FM) 144

Abbildung 95: R-I-Schema des Kaltwassersatzes 146

Abbildung 96:R-I-Schema des Kältesystems mit BHKW-abwärmegetriebener Absorptionskälteanlage 147

Abbildung 97: R-I-Schema des simulierten Systems mit Direktverdampfung 147

Abbildung 98:Elektrischer / thermischer Endenergiebedarf unterschiedlicher Industriekältesysteme unter verschiedenen Klimaszenarien (500 kW ganzjährige Kälteleistung bei +2 °C Kaltwasser- / Verdampfungstemperatur zur Kälteübergabe) 149

Abbildung 99: Primärenergiebedarf der unterschiedlichen Industriekältesysteme unter verschiedenen Klimaszenarien (500 kW ganzjährige Kälteleistung bei +2 °C Kaltwasser- / Verdampfungstemperatur zur Kälteübergabe) 150

Abbildung 100:TEWI unterschiedlicher Industriekältesysteme für verschiedene Klimaszenarien 151

Abbildung 101: Jahresgesamtkosten untersuchter Kältesysteme für den Bereich Industriekälte – für die Betriebskosten ist jeweils ein Mittelwert zu allen Kosten- und Klimaszenarien aufgeführt. Das Spektrum der Betriebskosten - generiert durch die Betrachtung verschiedener Kostenszenarien – wir durch die Fehlerbalken ersichtlich. 152

Abbildung 102:Zusammensetzung der Investitionskosten der verschiedenen Kältesysteme 153

Abbildung 103:Zusammensetzung der Betriebskosten für die verschiedenen Kostenszenarien (Klima: FM) 153

Abbildung 104:TEWI-Betrachtung für Kaltwassersatz mit unterschiedlichen Kältemitteln für das Klimaszenario Frankfurt mittleres Jahr 154

Abbildung 105:Schematischer Verlauf von Kälte- und Heizleistung sowie dem Wärmeverhältnis über der totalen treibenden Temperaturdifferenz 155

Abbildung 106: Schematischer Verlauf der treibenden Temperaturdifferenz und des Wärmeverhältnisses am Beispiel einer Wasser/LiBr-Absorptionskältemaschine (tKaW,ein = 4 °C, tHW,ein = 90 °C) 155

Abbildung 107: Ausschnitt aus dem Abwärmeatlas der Sächsischen Energieagentur - SAENA GmbH (rechts: Karte mit Standorten, links: Datenbankeintrag zu einem Standort) 161

Abbildung 108: Kältebedarf und gegenwärtiger bzw. perspektivischer Anteil der mit Abwärme angetriebenen Kältetechnik – Variante: Nutzung vorhandener Abwärme zur Kälteerzeugung 165

Abbildung 109: Erreichbare Elektroenergieeinsparungen in den einzelnen Branchen (Prozentanteile auf den Elektroenergiebedarf der Kälteerzeugung je Branche bezogen) - Variante: Nutzung vorhandener Abwärme zur Kälteerzeugung – Eigenbedarf Strom der AKM nicht berücksichtigt 165

Abbildung 110: Typische Ausbeute des Brennstoffeinsatzes in einem BHKW 166

Abbildung 111: Bisherige Abdeckung durch industrieeigene KWK-Anlagen oder Fernwärme und bisher nicht ausgeschöpfte Potenziale 167

Abbildung 112: Kältebedarf und gegenwärtiger bzw. perspektivischer Anteil der mit Abwärme angetriebenen Kältetechnik – Potenzial: Einsatz von Erdgas-betriebenen KWK-Anlagen 172

Abbildung 113:Erreichbare Stromeinsparungen in den einzelnen Branchen (Prozentanteile auf dem Strombedarf der Kälteerzeug je Branche gerechnet) - Potenzial: Einsatz von Erdgas-betriebenen KWK-Anlagen – Eigenbedarf Strom der AKM nicht berücksichtigt 172

Abbildung 114: Darstellung der Potenziale zur wärmegetriebenen Kälteerzeugung 173

Abbildung 115: Elektroenergiebedarf der Kältetechnik der einzelnen Branchen unter Berücksichtigung der wärmegetriebenen Kälteerzeugungspotenziale (Elektroenergiebedarf der AKM für Pumpen, Ventilatoren, etc. ist berücksichtigt) 174

Abbildung 116: Indirektes TEWI-Einsparpotenzial der einzelnen Branchen unter Berücksichtigung der wärmegetriebenen Kälteerzeugungspotenziale (Elektroenergiebedarf der AKM für Pumpen, Ventilatoren, etc. ist berücksichtigt) 175

Abbildung 117: Sich bedingende Abhängigkeiten für den Einsatz neuer Technologien 177

Abbildung 118: Typischen Füllmengen und Leistungsbereich von Kälteanlagen zur Klimatisierung, Quelle: 185

Abbildung 119: Kältemittelverteilung im Raum bei Auftreten eines Lecks, Vergleich zwischen Kühl-Gefrier-Kombination und Single-Split-AC-Gerät, Quelle: 188

Abbildung 120:Steuersätze bezogen auf CO2-Äquivalent bzw. auf die Kältemittel R134a und R404A 189

Abbildung 121: Zeitlicher Verlauf der geplanten Einschränkungen durch den Vorschlag zur EU-F-Gase-Verordnung 192

Abbildung 122: WP-Hersteller und deren Vertrieb von WP mit natürlichen Kältemitteln, (Müller et al. 2013)..... 194

Abbildung 123: Kosten für Kältemittel 200

Abbildung 124: Spezifische Kältemittelkosten bestehend aus Einkaufspreis und CO2-äquivalenter Besteuerung..... 201

Abbildung 125: Leistungsnomogramm einer Wasser/LiBr-Absorptionskälteanlage (Safarik et al. 2010)..... 206

Abbildung 126: Leckraten der untersuchten Anlagen..... 217

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Klimarelevante Daten zur stationären Kältetechnik in Deutschland 25

Table 2: Climate-relevant data of stationary refrigeration technology in Germany 42

Tabelle 3: Primärenergiefaktoren entsprechend der DIN V 18599-1:2011-12 58

Tabelle 4: Spezifische CO_2-Emissionen der betrachteten Antriebsformen von Kälteanlagen 63

Tabelle 5: GWP-Werte für relevante und in den Technologievergleichen verwendete Kältemittel.....63

Tabelle 6: Sicherheitsgruppen nach Brennbarkeit und Giftigkeit nach DIN EN 378-1 64

Tabelle 7: Kälte-, End- und Primärenergiebedarf nach Anwendungsgebiet.....80

Tabelle 8: Kälte-, End- und Primärenergiebedarf nach Branchen, inkl. Untergruppen 82

Tabelle 9: Strom- und Wärmebedarf, sowie dessen Deckung in den einzelnen Branchen und Untergruppen.....83

Tabelle 10: Auswirkungen von Systemkonzepten im Hinblick auf die Nachhaltigkeit.....85

Tabelle 11: Beispiele ausgeführter Kälteanlagen mit natürlichen Kältemitteln (Angaben ohne Gewähr).....96

Tabelle 12: Verfahren der sorptionsgestützten Klimatisierung..... 108

Tabelle 13: Primärenergiefaktoren (nicht erneuerbarer Anteil) nach (Robbi & Sander 2012) für die auftretenden Endenergieformen 110

Tabelle 14: Auf die Kältemittelfüllmengen bezogene Leckraten und Entsorgungsverluste verschiedener Kälteanlagen (Daten zur amtlichen Berichterstattung ab 2012 (Strogies & Gniffke 2013)..... 111

Tabelle 15: GWP-Werte für die in den Technologievergleichen verwendeten Kältemittel..... 111

Tabelle 16: Den Betriebskostenberechnungen zugrundeliegende Preise für Strom und Wärme für verschiedene Preis-Szenarien..... 114

Tabelle 17: Systemparameter des solargetriebenen Absorptionssystems..... 117

Tabelle 18: Wichtige Systemparameter des Multi-Split-VRF-Systems 118

Tabelle 19: Wichtige Systemparameter des KWS-Systems (mit verschiedenen Kältemitteln wurde nur Variante 3b für den KWS ohne Speicher und Kühldecke berechnet) 120

Tabelle 20: Wichtige Systemparameter des DEC-Systems 121

Tabelle 21: Wesentliche Parameter des Gebäudemodells..... 123

Tabelle 22: Vorgehensweise und Annahmen bei der Modellierung der Kältesysteme..... 125

Tabelle 23: Systemparameter – Variante 5 (Industriekälte, KWS)..... 146

Tabelle 24: Systemparameter – Variante 6 (Industriekälte, AKM)..... 147

Tabelle 25: Systemparameter – Variante 7 (Industriekälte, direktverdampfendes System) 147

Tabelle 26: Bewertung des Kältebedarfs sowie der Abwärmequellen - Schätzung des einzusparenden Strombedarfs durch Nutzung von wärmegetriebenen Kältesystemen 162

Tabelle 27: Bewertung des Kältebedarfs in Kombination mit möglichen KWKK-Installationen - Abschätzung des einzusparenden Strombedarfs durch Nutzung von wärmegetriebenen Kältesystemen 169

Tabelle 28: Einteilung von Kältemitteln, Anlagensystemen und Aufstellungsorten in der DIN EN 378 184

Tabelle 29: Daten bezüglich Brennbarkeit/Explosivität für ausgewählte Kältemittel der Sicherheitsklasse A3, Quelle: DIN EN 378, Sicherheitsdatenblätter der Kältemittel 184

Tabelle 30: Einbauhöhen nach Aufstellungsart, Quelle: DIN EN 378 185

Tabelle 31: Praktische Grenzwerte natürlicher Kältemittel nach DIN EN 378 186

Tabelle 32: Möglichkeiten der Anwendung von natürlichen Kältemitteln für unterschiedliche Fälle ausgehend von der Norm DIN EN 378 187

Tabelle 33: Besteuerung von Kältemitteln in einzelnen Staaten, Quellen: (Honeywell 2012; Rhiemeier, Harnisch & Kauffeld 2008; Strogies & Gniffke 2013) 189

Tabelle 34: Überblick über HFKW-Verbote in Europa 190

Tabelle 35: Untersuchte Szenarien zum HFKW-Phase-Down innerhalb der EPEE-Studie 190

Tabelle 36: Reduzierung der Bruttoemissionen (Mio. t_{CO2}) verglichen mit Szenario A, Europa 2030 191

Tabelle 37: Kosten der Emissionsreduzierungen (€ / t_{CO2}) verglichen mit Szenario A, 2030 191

Tabelle 38: Natürliche Kältemittel und technisch zu berücksichtigende Eigenschaften 198

Tabelle 39: Anforderungen an Dichtigkeitskontrollen nach F-Gase-Verordnung (VO EG 842/2006) 199

Tabelle 40: Mittlere Leckraten nach Kältemittelfüllmenge 218

Tabelle 41: Einordnung der Untersuchungsergebnisse aus 218

Tabelle 42: Zulässige Leckraten nach dem FKT-Stufenplan, umgesetzt in der ChemKlimaSchutzV 218

Tabelle 43: Ergänzende Angaben zur Modellierung des Multi-Split-VRF-Systems 219

Tabelle 44: Ergänzende Angaben zur Modellierung des Kaltwassersatzes (mit/ohne Speicher, Umluftkonvektoren/Kühldecke) 220

Tabelle 45: Ergänzende Angaben zur Modellierung der Raumlufttechnischen Anlage mit DEC-System 221

Tabelle 46: Ergänzende Angaben zur Modellierung des Kaltwassersatzes für den Bereich Industriekälteversorgung 222

Tabelle 47: Ergänzende Angaben zur Modellierung der Absorptionskälteanlage für den Bereich Industriekälteversorgung..... 222

Tabelle 48: Ergänzende Angaben zur Modellierung des Direktverdampfungssytems für den Bereich Industriekälteversorgung 223

Tabelle 49 : Aufstellung von Investitions-, Instandhaltungs-, und Entsorgungskosten der betrachteten Systeme im Bereich der Gebäudeklimatisierung (für VRF- und KWS-System, Bürofläche 400 m^2, Nennkälteleistung der Systeme 25 kW (außer DEC-System 57,9 kW), inkl. MWSt.) 224

Tabelle 50: Aufstellung von Investitions-, Instandhaltungs-, und Entsorgungskosten der betrachteten Systeme im Bereich der Gebäudeklimatisierung (für AKM- und DEC-System, Bürofläche 400 m^2, Nennkälteleistung der Systeme 25 kW (außer DEC-System 57,9 kW), inkl. MWSt.) 225

Tabelle 51: Aufstellung von Investitions-, Instandhaltungs- und Entsorgungskosten der betrachteten Systeme im Industriekältesektor (Nennkälteleistung der Systeme 500 kW inkl. MWSt.) 226

Abkürzungen

AKM	Ab- oder Adsorptionskältemaschine
AbKM	Absorptionskältemaschine
AdKM	Adsorptionskältemaschine
AGFW	Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft
ALF	Absolute Luftfeuchte
BHKW	Blockheizkraftwerk
COP	Coefficient of Performance (Leistungszahl)
DEC	Desiccative and Evaporative Cooling (Luftkühlung durch offenen Sorptionsprozess in Verbindung mit Verdunstungskühlung)
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
EER	Energy Efficiency Ration (Leistungszahl)
FKT	Forschungsrat Kältetechnik
FKW	vollständig halogenierten Fluorkohlenwasserstoffe
GHD	Gewerbe, Handel und Dienstleistung
GuD	Gas- und Dampftturbinen-Kraftwerk
GWP	Global Warming Potential (Treibhausgaspotenzial)
HFKW	teil-halogenierter Fluorkohlenwasserstoff
HFO	ungesättigter Fluorkohlenwasserstoff (Hydrofluoroolefin)
KKM	Kompressionskältemaschine
KM	Kältemittel
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz
KWKK	Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung
KWS	Kaltwassersatz
RLT	Raumlufttechnische Anlage
SEER	Seasonal Energy Efficiency Ratio (Jahresarbeitszahl)
TEWI	Total equivalent warming impact (Summe aus direkten und indirekten Treibhausgaseffekt)
UEG	untere Explosionsgrenze
VRF	Variable Refrigerant Flow (Multi-Split-System mit variablem Kältemittelmassenstrom)
WP	Wärmepumpe

1 Zusammenfassung

Die Kältetechnik in Deutschland weist insgesamt einen Anteil am Elektroenergiebedarf von ca. 14 % auf und ist für etwa 5 % der Treibhausgasemissionen (direkte und indirekte Emissionen) verantwortlich. Angesichts der nationalen Klimaschutzziele verdeutlichen diese Zahlen den Handlungsbedarf zur Erhöhung der Klimafreundlichkeit in der Klima- und Kältetechnik. Die vorliegende Studie dient als Grundlage für Aktivitäten zur Verbesserung der Nachhaltigkeit in diesem Bereich. Sie umfasst Untersuchungen auf dem Gebiet der Industriekälte und Gebäudeklimatisierung.

Ausgangspunkt stellt eine Aufschlüsselung des Kältebedarfs nach Anwendungsbranchen, dort bisher verwendeten Techniken und dem damit verbundenen Endenergiebedarf dar. Die Aufschlüsselung des Kälteenergiebedarfs wird durch charakterisierende Merkmale, welche für spätere Analysen und Bewertungen von Bedeutung sind, ergänzt. Im Anschluss erfolgt ein Überblick über klimafreundliche Kältesysteme und eine Recherche zur Verfügbarkeit der Systeme und notwendiger Einzelkomponenten am Markt.

Nachfolgend werden für die Einsatzfälle (Nichtwohn-)Gebäudeklimatisierung und Industriekälte unterschiedliche Systeme und Systemvarianten anhand von dynamischen Anlagensimulationen über einen Jahreszeitraum untersucht. Ausgehend von den Berechnungsergebnissen werden Schlussfolgerungen hinsichtlich der Klimafreundlichkeit der untersuchten Systeme gezogen und der Einfluss unterschiedlicher Faktoren diskutiert.

Bei vorhandenen (Ab)wärmequellen bieten thermisch getriebene Kälte- und Klimasysteme die Möglichkeit zur Primärenergieeinsparung und zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen. Die Ausweitung der Nutzung thermisch angetriebener Kältesysteme wird anhand unterschiedlicher Annahmen für die ausgewählten Bereiche untersucht und das mögliche Potenzial dargestellt.

Im Abschluss erfolgt eine Analyse von Hemmnissen und Werkzeugen zur Etablierung klimafreundlicher Kältesysteme am Markt.

1.1 Nutz-, Endenergiebedarf und Klimarelevanz der Kältetechnik

Die stationäre Kälteerzeugung in Deutschland ist insgesamt für einen Strombedarf von ca. 70 TWh im Jahr 2008 verantwortlich (Guntram Preuß 2011). Dies entspricht über 13 % des Elektroendenergiebedarfs (Umweltbundesamt 2012a). Mit den spezifischen CO_2-Emissionen der Stromproduktion des Jahres 2008 von 568 g CO_2/kWh_{el} (Umweltbundesamt 2012a) verursachte die Kältetechnik etwa 40 Mio. t CO_2–Emissionen (indirekte Emissionen). Weitere 5,6 Mio. t CO_2-äquivalente Emissionen werden durch die direkte Treibhausgaswirkung von Kältemittelemissionen verursacht (Becken & Plehn 2010). Durch hohe Zuwachsraten[1] bei Neuanlagen im Bereich der Gebäudeklimatisierung steigen die Emissionen in Zukunft weiter an. Die klimarelevanten Daten zur stationären Kältetechnik sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

[1](Ecodesign 2008) geht von Steigerungsraten der installierten Klimakälteleistung zwischen 3,5 und 5 %/a aus (siehe auch Abbildung 30 ff. Seite 50).

Tabelle 1: Klimarelevante Daten zur stationären Kältetechnik in Deutschland

Kennzahl	Wert	Anmerkung
Elektroenergiebedarf der stationären Kältetechnik in Deutschland	70.695 GWh/a	Datenbasis 2008, (Guntram Preuß 2011),
Anteil am gesamten Elektroenergiebedarf in Deutschland	13,5 %	Datenbasis 2008, (Guntram Preuß 2011; Umweltbundesamt 2012a)
Treibhausgasemissionen der stationären Kältetechnik in Deutschland	45,8 Mio. t	Datenbasis 2008 für Elektroenergiebedarf (Umweltbundesamt 2012a) , Datenbasis 2007 für direkte Kältemittelbedingte-Emissionen (Becken & Plehn 2010)
Anteil an den gesamten Treibhausgas-emissionen in Deutschland	4,7 %	Datenbasis 2008
indirekter Anteil (Elektroenergiebedarf)	40,2 Mio. t (81,6 %)	
direkter Anteil (Treibhausgaswirkung der Kältemittelemissionen)	5,6 Mio. t (18,4 %)	
Elektroenergiebedarf der Kältetechnik der Bereiche Industriekälte und Gebäudeklimatisierung	30.244 GWh/a (42,8%)	prozentualer Anteil bezogen auf den Elektroenergiebedarf der gesamten Kältetechnik in Deutschland

Abbildung 1 zeigt den Elektroendenergiebedarf der Kältetechnik aufgeteilt nach Anwendungsbranchen (Guntram Preuß 2011). Für die vorliegende Studie sind hierbei die Anwendungen in der Industriekälte, der Nahrungsmittelindustrie sowie der stationäre Anteil der Klimakälte relevant. Für diese Anwendungsbereiche ergibt sich ein Gesamtkältebedarf von 63.173 GWh/a (Abbildung 2), für dessen Deckung ein Endenergiebedarf von etwa 30 TWh/a Elektroenergie (5,7% des gesamten Elektroenergiebedarfs in Deutschland) und 3 TWh/a Wärme benötigt werden. Die Datengrundlage wird in Kapitel 5 ab Seite 65 erläutert. Eine detaillierte Unterteilung der Ergebnisse nach Bereichen ist auf Seite 82 enthalten.

Abbildung 1: Anteil am Elektroendenergiebedarf der Kältetechnik nach Branchen (Guntram Preuß 2011)

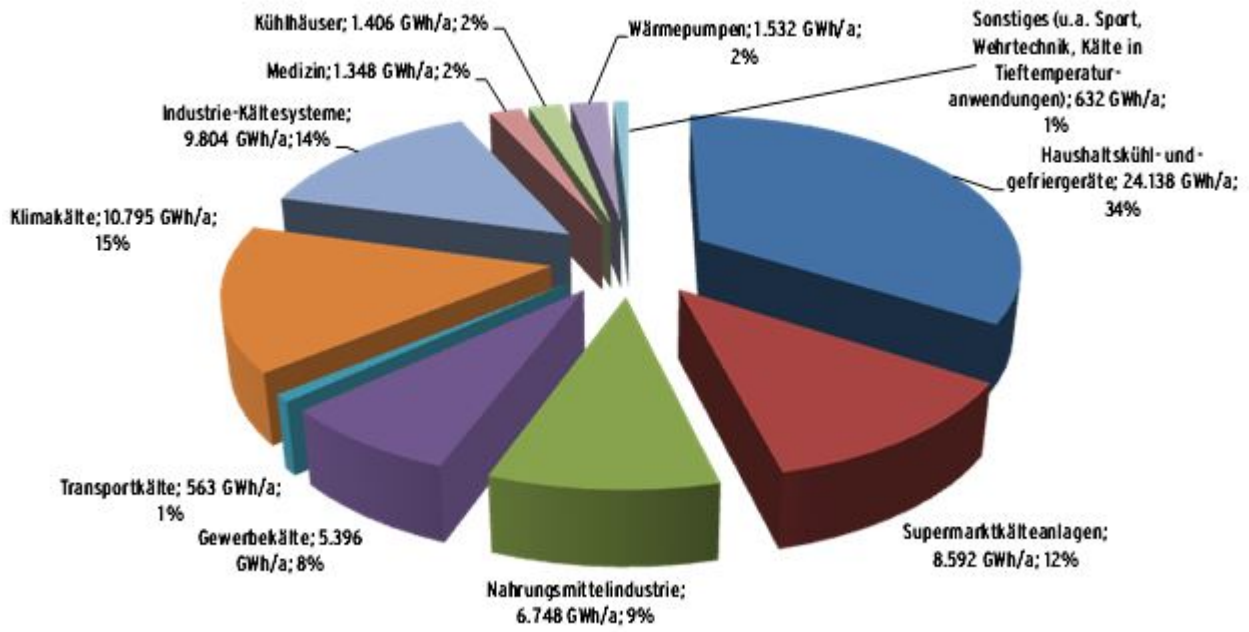
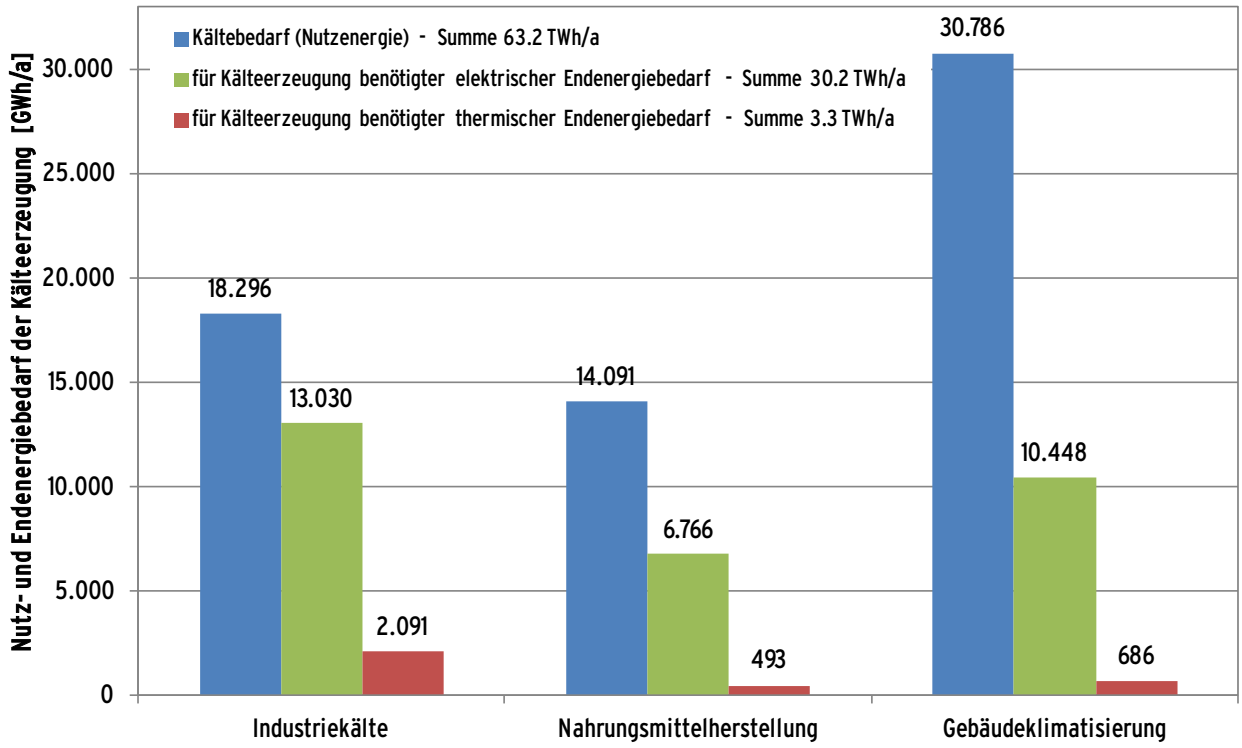


Abbildung 2: Nutz- und Endenergiebedarf der Kälteerzeugung der betrachteten Anwendungen



Die stationäre Kälte- und Klimatechnik, die Gewerbekälte ausgenommen, verursachte 2007 etwa 800 t direkte HFKW-Emissionen (Becken & Plehn 2010). Dies entspricht ca. 1,6 Mio. t CO_2-Äquivalent. Betrachtet man die in der zitierten Studie dargestellten Emissionen der Vorjahre, so ist ein jährlicher Anstieg zwischen 15 und 20% zwischen den Jahren 2002 und 2007 zu beobachten.

Der Bereich Klimakälte weist aufgrund der klimatischen Bedingungen in Deutschland eine geringe Vollbenutzungsstundenzahl auf. Der Leitfaden für Energiebedarfsausweise in Nichtwohngebäuden (BMVBS 2007) gibt für Bürogebäude 500 h, für Bildungsgebäude 350 h an. Die durchgeführten Simulationen ergeben Volllaststunden im Bereich von 400 bis 520 h. Im Rahmen des EvaSolK-Projekts wurden unterschiedliche Klimakälteerzeugungssysteme (Kaltwassersätze, Mono- und Multi-Split-Systeme) im praktischen Einsatz vermessen. Hierbei ergaben sich Volllaststundenzahlen zwischen 170 und 430 h (Wiemken, Safarik, et al. 2012; Wittig et al. 2012). Neben den klimatischen Bedingungen liegt ein weiterer Grund für die geringe Auslastung von Klimaanlagen in der Anlagenauslegung, die neben Sicherheitsfaktoren auch zukünftige Pläne der Betreiber, wie z.B. Gebäudeerweiterungen, berücksichtigt. Dadurch werden Gebäudeklimaanlagen häufig überdimensioniert.

Durch die geringe Vollbenutzungsstundenzahl ist der direkte TEWI-Anteil für Klimakälteanlagen bei Leckraten zwischen 4 und 7 % (Strogies & Gniffke 2013) ein wesentlicher Faktor. Dies zeigen auch die Simulationsergebnisse. Durch den Einsatz des Kältemittels R410A bei Kaltwassersätzen liegt der direkte TEWI-Anteil – je nach betrachteter Klimaregion – bei ca. 40 %. D.h. ca. 40 % der treibhauswirksamen Emissionen werden allein durch das Entweichen von Kältemittel verursacht, die verbleibenden 60 % durch den Energiebedarf während des Betriebes. Für R134a ergibt sich ein direkter Anteil von ca. 32 % und für R32 von ca. 18 %. Bei dem HFKW-Kältemittel R1234yf und natürlichen Kältemitteln wie R290, R717 und R718 hat der direkte TEWI-Anteil einen sehr geringen bis keinen Einfluss auf den Gesamtwert. Bei

direktverdampfenden Systemen ergeben sich aufgrund größerer Kältemittelfüllmengen noch höhere direkte Anteile am Gesamt-TEWI. Unter den oben genannten Annahmen liefern die Simulationsergebnisse einen Anteil von ca. 70 % für das Kältemittel R410A.

Bei einer besseren Auslastung der Kälteanlage reduzieren sich die relativen direkten Anteile. So ergibt sich aus den Simulationsergebnissen für einen ganzjährig betriebenen Kaltwassersatz in der Industriekälte ein direkter Anteil von unter 10 %. Trotz dieses relativ geringen Anteils sind die absoluten Emissionswerte durch das Entweichen von Kältemitteln mit hohem GWP-Wert nicht zu unterschätzen.

1.2 Bewertung verschiedener Kälteerzeugungstechniken

Ziel ist die Bewertung verschiedener Kälteerzeugungstechniken in der Gebäudeklimatisierung nach ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten, wobei die Auswirkungen auf das Klima im Vordergrund stehen. Hierzu werden Verbrauchs- und Emissionsdaten verschiedener Kältesysteme ermittelt und miteinander verglichen, welche zur Deckung einer mittels Simulationsprogramm bestimmten Kühllast in der Gebäudeklimatisierung und in der Industriekälteerzeugung herangezogen werden.

Die Basis der Bewertung sind dynamische Simulationen eines Nichtwohngebäudes und der dazugehörigen Anlagentechnik. Die Simulationen erfassen den Kältebedarf über den gesamten Jahreszeitraum in zwei unterschiedlichen Klimaregionen (Frankfurt und Hamburg) bei unterschiedlichen Klimaszenarien (mittlerer Sommer und extremer Sommer). Für die verschiedenen Kältesysteme und Klimaszenarien erfolgen Berechnungen zum Endenergiebedarf und den verursachten Treibhausgasemissionen nach dem TEWI-Ansatz.

Dem Vergleich von Systemen zur Gebäudeklimatisierung wird ein Ein-Zonen-Großraumbüro mit quadratischer Grundfläche von 400 m^2 zugrunde gelegt. Das Lastszenario entspricht einer typischen Büronutzung mit maximalen inneren Lasten von 30 W/m^2. Die Anlagentechnik entspricht dem Stand der Technik (z.B. Kondensationsdruckbegrenzung entsprechend einer Kondensationstemperatur von 15 °C, Kaltwasservorlauftemperatur minimal 10 °C). Die vergleichende Betrachtung wurde mit den folgenden Kältesystemen durchgeführt:

- System mit solar- und fernwärmegetriebener Absorptionskältemaschine und Deckenkühlsystem zur Wärmeübergabe (AKM)
- Multi-Split-System mit variablem Kältemittelmassenstrom unter Verwendung von Gebläsekonvektoren zur Wärmeübergabe (VRF)
- Kompressionskältemaschine (Kaltwassersatz, Kondensationsdruckbegrenzung minimal t_C = 15 °C) mit Deckenkühlsystem oder Gebläsekonvektoren zur Wärmeübergabe sowie mit und ohne Kaltwasserspeicher (KWS)
- Raumlufttechnische Anlage mit offener Flüssigsorption unter Nutzung von BHKW-Abwärme (DEC: desiccative and evaporative cooling)

Für die Untersuchungen im Bereich der Industriekälte wird für alle Systeme ein ganzjährig konstanter Kältebedarf von 500 kW bei einer Kälteträger-Temperatur an der Übergabestelle von +2°C angenommen. Für diesen Bereich erstreckt sich die Betrachtung über folgende Systeme:

- Kaltwassersatz mit Kompressionskältemaschine (KWS)
- Direktverdampfendes Kompressionskältesystem
- BHKW-abwärmegetriebene Absorptionskältemaschine (AbKM)

Ein energetischer Vergleich der Systeme erfolgt anhand des Endenergiebedarfs. Unter Berücksichtigung des Energiegehaltes der einbezogenen Energiequellen und Energieträger wird daraus der Primärenergiebedarf abgeleitet und ebenfalls verglichen. Verwendete Primärenergiefaktoren sind dem Entwurf der EnEV 2013 bzw. der DIN V 18599 – 1:2011-12 entnommen.

Für Betrachtungen zur Klimarelevanz ist der TEWI (*Total equivalent warming impact*) eine wichtige Vergleichsgröße. Dieser berücksichtigt zum einen CO_2-Emissionen, welche durch den Energiebedarf während des Anlagenbetriebes hervorgerufen werden (indirekter Anteil). Für die Berechnungen wird Elektroenergie mit 583 g CO_2/kWh (Strommix Deutschland 2010 inkl. Vorkette) bewertet. Die Bewertung der benötigten Wärme erfolgt nach drei verschiedenen Methoden. Mit resultierenden Werten von 0, 44 und 239 g CO_2/kWh lässt sich in Abhängigkeit verschiedener Energiequellen ein Ergebnisraum aufspannen. Für Wärme aus Umweltenergie wird ein Emissionswert von 0 g CO_2/kWh angesetzt. Der TEWI berücksichtigt weiterhin die Emission klimawirksamer Stoffe aufgrund von Leckagen im Kältekreislauf sowie Entsorgungsverluste (direkter Anteil). Es werden je nach System jährliche Leckraten von 4 – 7 % und Entsorgungsverluste von 30 % zugrunde gelegt.

Die Betrachtungen beinhalten ebenfalls eine ökonomische Gegenüberstellung der verglichenen Systeme. Diese beinhaltet Investitions-, Betriebs-, Instandhaltungs- und Entsorgungskosten. Bei der Berechnung der Betriebskosten werden mehrere Kostenszenarien einbezogen, in denen verschiedene Energiepreiskonstellationen Berücksichtigung finden (Strompreise 6 – 25 ct/kWh, Wärmepreise 0 – 8 ct/kWh).

Für die Untersuchungen im Bereich Gebäudeklimatisierung wird auch der Aspekt der thermischen Behaglichkeit einbezogen.

Ergebnisse Gebäudeklimatisierung

Hinsichtlich der Behaglichkeit liefern Systeme mit Konvektoren die besten Ergebnisse. Kühldecken-Systeme sind besonders in feuchtwarmen Sommern nicht in der Lage, eine ausreichende Kühlleistung über den gesamten Klimatisierungszeitraum bei Unterbindung von Kondensation an den Kühlflächen zu erreichen. Eine Feuchtekontrolle ist mit Kühldecken nicht möglich. DEC-Systeme sind im Hinblick auf die Be- und Entfeuchtung positiv zu bewerten, durch die nach unten begrenzte Zulufttemperatur jedoch hinsichtlich der Kühlleistung beschränkt, was besonders an heißen Tagen zu Temperaturüberschreitungen führt. Durch ein solares Kältesystem mit AKM kann unter Berücksichtigung realistischer Größen für Kollektorfläche und Heißwasserspeicher die Kältelast nur durch Einbindung einer zusätzlichen Wärmequelle (z.B. Fernwärme) oder einer Kompressionskälteanlage als Back-up gedeckt werden. Für die betrachteten Klimaszenarien ergeben sich bei rein solarer Kühlung unbefriedigend häufig Überschreitungen der angestrebten maximalen Raumtemperatur. Eine energetische und wirtschaftliche Gegenüberstellung mit den Vergleichssystemen ist daher nur bedingt aussagekräftig.

Wird die rein solare Kühlung außer Betracht gelassen, zeigen sich bei einem primärenergetischen Vergleich für die Kompressionskälte-Systeme die niedrigsten Bedarfswerte. Dabei hat das VRF-System den höchsten Elektroenergiebedarf. Dies ist hauptsächlich bedingt durch die relativ niedrigen Verdampfungstemperaturen (6 °C) und eine damit einhergehende hohe Entfeuchtungsleistung. Die Erweiterung eines KWS-Systems durch einen Kaltwasserspeicher bewirkt je nach Klima eine Verringerung des elektrischen Energiebedarfes um 10 % bis 12 %. Durch Installation einer Kühldecke anstelle der Luftkonvektoren ergeben sich energetische Einsparpotenziale von bis zu 30 %, allerdings bei Einschränkungen hinsichtlich der Behaglichkeit. Raumlufttechnische Anlagen mit DEC-System erreichen durch die nach unten begrenzte Zulufttemperatur (16 °C sollten nicht unterschritten werden) nur geringe Temperaturdifferenzen zwischen Zu- und Abluft. Der Kältebedarf muss

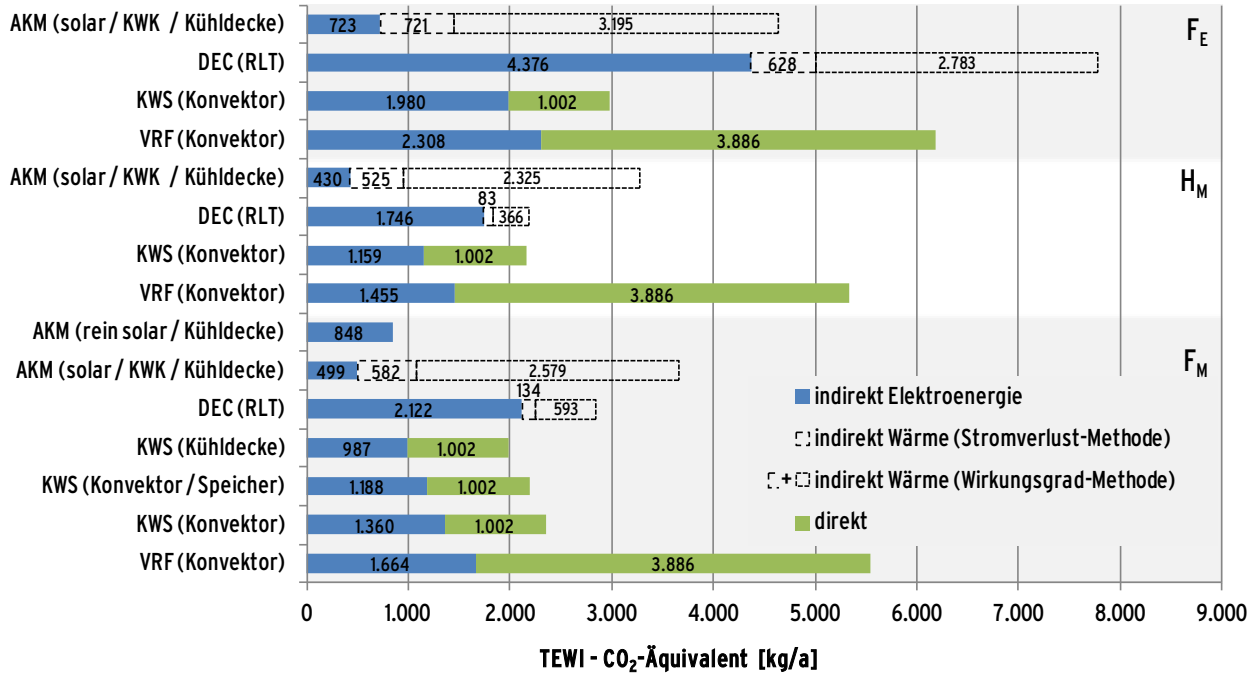
somit durch hohe Luftvolumenströme gedeckt werden. Gleichzeitig wird die Zuluft geregelt entfeuchtet. Dies führt zu großem Energieaufwand durch den Betrieb der Ventilatoren für die Luftförderung. Das DEC-System kann jedoch dann vorteilhaft sein, wenn eine Anwendung ohnehin hohe Luftwechselraten und eine geregelte Entfeuchtung erfordert.

Die geringe Zahl an Vollbenutzungsstunden (ca. 460 h für das Szenario Frankfurt mittleres Jahr (F_M), entspricht einem Vollbenutzungsgrad von 5%) für den Betrieb von Kältesystemen in den betrachteten Klimaregionen, führt zu einem unerwarteten Bild hinsichtlich des Verhältnisses von direkten und indirekten TEWI-Emissionen (Abbildung 3). Aufgrund geringer Betriebszeiten der Anlage und dem daraus resultierenden Strombedarf, ist der indirekte Anteil der Emissionen, verglichen mit anderen Kälteanwendungen (z.B. Gewerbekälte), sehr klein. Besonders stechen hier die Ergebnisse des VRF-Systems hervor. Durch den hohen direkten TEWI-Anteil (ca. 70 %) spielt der Einfluss des Energiebedarfes (ca. 30 %) nur noch eine untergeordnete Rolle. Daraus folgt für Anlagen zur Kälteerzeugung in der Gebäudeklimatisierung, dass ein geringes GWP des eingesetzten Kältemittels sowie eine gute Anlagendichtheit entscheidend für die Klimawirkung sind. Die hier durchgeführten Berechnungen und Recherchen zeigen, dass natürliche Kältemittel wie Ammoniak und Propan mit ihren niedrigen GWP-Werten neben Vorteilen durch den geringen direkten TEWI-Anteil auch energetische Vorteile beim Einsatz in Kompressionskälteanlagen im Vergleich zu HFKW-Kältemitteln aufweisen.

Thermische getriebene AKM-Systeme liefern je nach eingesetzter Wärmequelle sehr unterschiedliche Ergebnisse. Bei günstigen Bedingungen (Abwärme aus Erdgas-BHKW unter Berücksichtigung des Verdrängungsmixes) kann die Wärme mit einem TEWI von 0 g CO_2/kWh bewertet werden. Ein indirekter TEWI-Anteil entsteht in diesem Fall nur durch die notwendigen Hilfsenergien für Rückkühlung und Kälteverteilung, nicht jedoch durch die thermische Antriebsenergie. Die Klimawirksamkeit dieses Systems ist dann im Vergleich zu den anderen Systemen minimal. Wird bei der Betrachtung die Nutzung von Fernwärme aus einem GuD-Kraftwerk vorausgesetzt (in Abbildung 3 „Stromverlust-Methode“) liefert die Wärme einen Beitrag zum indirekten TEWI. Die Summe aus direkten und indirekten Anteilen ist dann immer noch deutlich niedriger als bei den Vergleichssystemen. Wird die nötige Wärme allerdings aus einem Kohleheizkraftwerk bezogen (in Abbildung 3 „Wirkungsgrad-Methode“) ergeben sich sehr hohe TEWI-Werte, welche diejenigen der meisten Vergleichssysteme übertreffen[2].

[2] Hintergründe und Details zu den ausgewählten Szenarien der Emissionsbewertung der thermischen Antriebsenergie sind im Abschnitt 4.2.10 Emissionsfaktoren der Strom- und Wärmeerzeugung ab Seite 39 dargelegt. Die ausgewählten Szenarien sind in Tabelle 4 auf Seite 42 zusammengefasst.

Abbildung 3: TEWI-Betrachtung für verschiedene Kälte-Systeme – Unterteilung in direkte und indirekte TEWI-Anteile (die Antriebswärme wird mit verschiedenen Allokationsmethoden berücksichtigt – siehe Abschnitt 4.2.10)

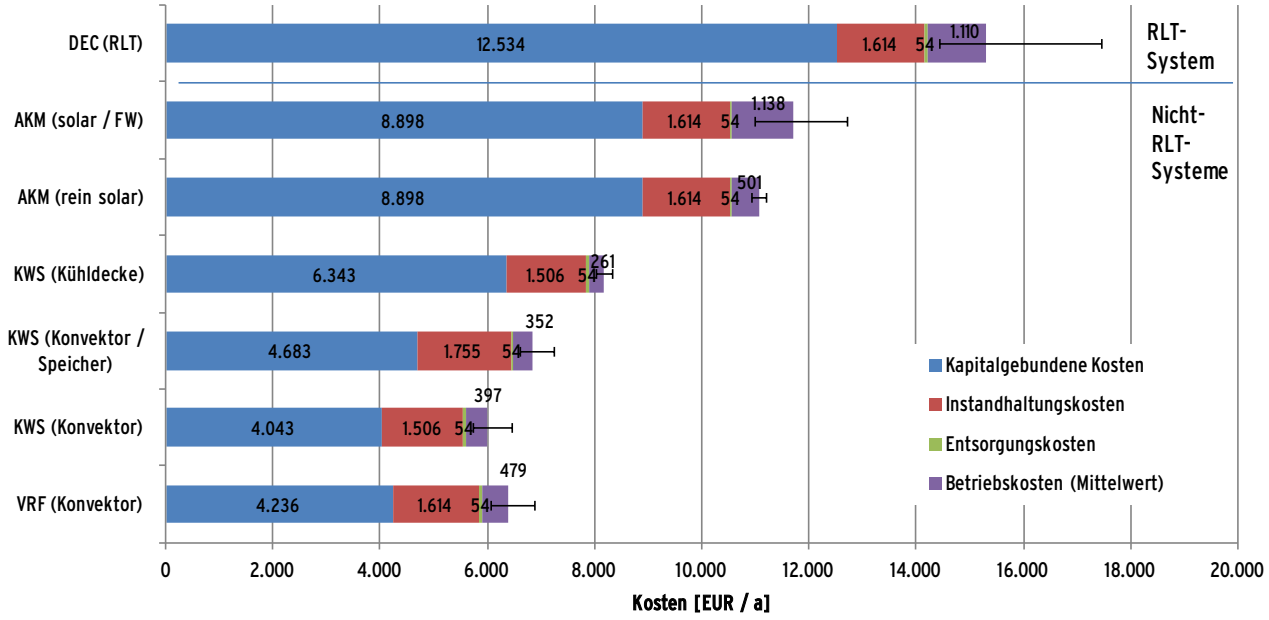


Die Gegenüberstellung der Gesamtkosten untersuchter Kältesysteme für den Anwendungsbereich der Büroklimatisierung liefert ein breites Spektrum (Abbildung 4). In dieser Untersuchung schneiden die Systeme mit Kompressionskälte für den berücksichtigten Anwendungsfall wirtschaftlich deutlich günstiger ab als die übrigen Systeme. Das AKM-System verursacht über 50 % und das DEC-System über 130 % Mehrkosten im Vergleich zu den klassischen Kältesystemen. Den größten Einfluss haben hier die Investitionskosten. Diese übersteigen sowohl für das AKM-System, als auch für das DEC-System bereits die Gesamtkosten der Kompressionskältesysteme. Die Betriebskosten tragen nur zu einem relativ geringen Teil zu den Gesamtkosten bei. Selbst eine Betrachtung von Kostenvariationen aufgrund verschiedener Betriebskosten-Szenarien verändert dieses Verhältnis nicht wesentlich. Das Ergebnis liegt in der geringen Anzahl an Vollbenutzungsstunden begründet. Für alle Kältesysteme und betrachteten Klimaregionen liegt diese unter 800 h, was einem Nutzungsgrad[3] kleiner 10 % entspricht. Instandhaltungs- und Entsorgungskosten unterscheiden sich nicht wesentlich für die verschiedenen Kältesysteme und spielen daher bei einem Kostenvergleich keine ausschlaggebende Rolle.

Bei dem betrachteten Anwendungsbeispiel dominieren die Investitionskosten der Kältesysteme, da bei relativ geringer Vollbenutzungsstundenzahl die Betriebskosten entsprechend niedrig ausfallen. Alternative Kältesysteme wie AKM oder DEC-Systeme sind hier bei den derzeitigen Kostenstrukturen wirtschaftlich im Nachteil, da diese deutlich höhere Investitionskosten verursachen, die sich über geringere Betriebskosten nur über lange Zeiträume oder gar nicht amortisieren.

[3] Unter dem Nutzungsgrad ist hier der Quotient aus der Summe der erzeugten Kälteenergie pro Jahr zur maximal möglichen Kälteenergieerzeugung über das Gesamtjahr der Anlage zu verstehen.

Abbildung 4: Jahresgesamtkosten untersuchter Kältesysteme für den Bereich Gebäudeklimatisierung – für die Betriebskosten ist jeweils ein Mittelwert für alle Energiekosten- und Klimaszenarien angegeben. Das Spektrum der Betriebskosten - verursacht durch die Betrachtung verschiedener Kostenszenarien – wir durch die Fehlerbalken ersichtlich.



Ergebnisse Industriekältebereitstellung

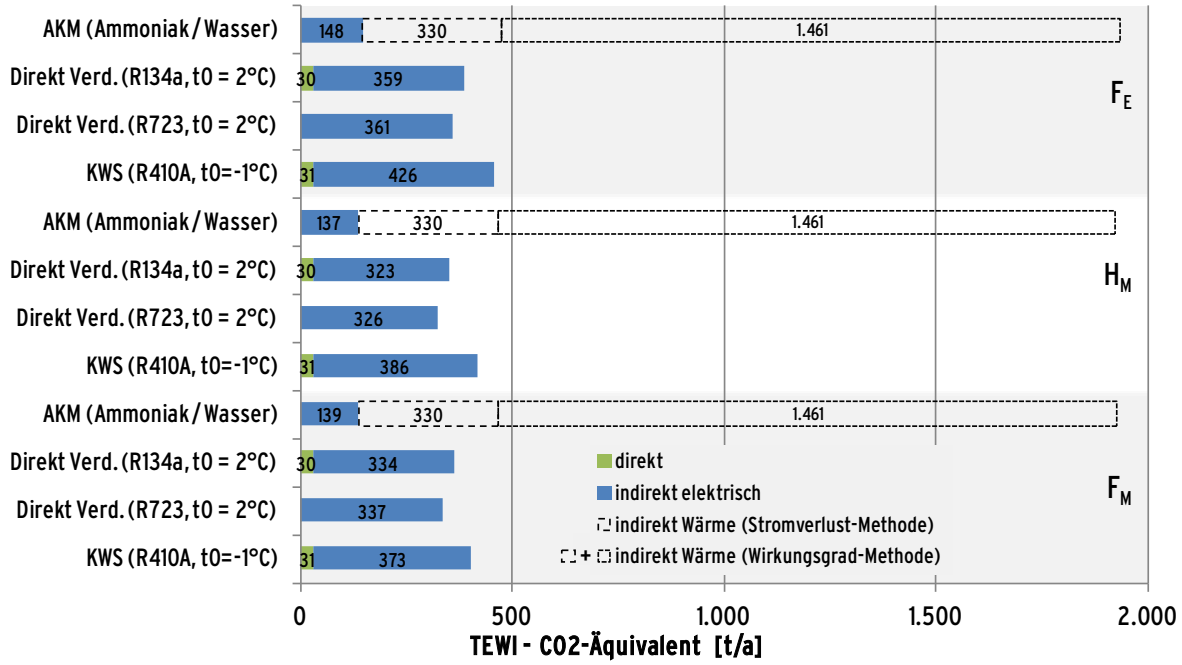
Wie schon bei der Gebäudeklimatisierung weisen die Kompressionskälte-Systeme auch bei der Industriekältebereitstellung den geringsten primärenergetischen Bedarf auf. Sowohl für direkt verdampfende als auch für Kaltwassersysteme bestehen feste Vorgaben hinsichtlich der Temperatur des Kälteträgers bei der Kälteübergabe. Hierdurch sind die Kaltwassersätze im Nachteil, da durch einen zusätzlichen Wärmeübergang an den Kälteträgerkreislauf niedrigere Verdampfungstemperaturen nötig sind.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass der Einsatz von natürlichen Kältemitteln energetische Vorteile bringen kann. Gegenüber R134a liefern die Kältemittel R290, R717 und R718 einen nahezu identischen Elektroenergiebedarf (Abweichungen kleiner 1%). Vergleicht man die Werte mit dem Einsatz von R410A ergeben sich für die natürlichen Kältemittel Effizienzverbesserungen von etwa 3%. Demgegenüber steht ein Mehrbedarf an Elektroenergie von über 10% bei Einsatz von R1234yf. Datenblattangaben auf dem Markt verfügbarer Anlagen deuten darauf hin, dass Kältesystem, die mit natürlichen Kältemitteln betrieben werden, im energetischen Vergleich noch besser abschneiden als hier berechnet.

Die Kältebereitstellung mit der AKM ist aus elektroenergetischer Sicht im Vergleich zu den anderen Systemen herausragend effizient. Hinzu kommt jedoch bei der betrachteten Anwendung ein großer Bedarf thermischer Energie, welcher in ungünstigen Fällen dem bis zu 30-fachen des elektrischen Energiebedarfs der AKM entspricht. Daher ergeben sich für Absorptionskälteanlagen erheblich höhere primärenergetische Bedarfswerte. Eine Ursache liegt in der nur noch marginalen Verbesserung des Wärmeverhältnisses von Absorptionskältemaschinen bei kleinen Temperaturhüben.

In Abbildung 5 sind die TEWI-Emissionen der Industriekältesysteme dargestellt. Die direkten Emissionen bei den Kompressionssystemen spielen eine weitaus geringere Rolle als bei der Gebäudeklimatisierung. Ursache ist die hohe Zahl der Vollbenutzungsstunden. Unter den getroffenen Annahmen führt das direkt-verdampfende System mit dem Kältemittel R723 zu den geringsten TEWI-Emissionen. Auch bei Verwendung des fluorierten Kältemittels R134a lassen sich Vorteile gegenüber einem indirekt-verdampfenden KWS-System erreichen. Diese Ergebnisse sind jedoch stark vom Einsatzfall abhängig (z.B. Kältemittel-Leckraten).

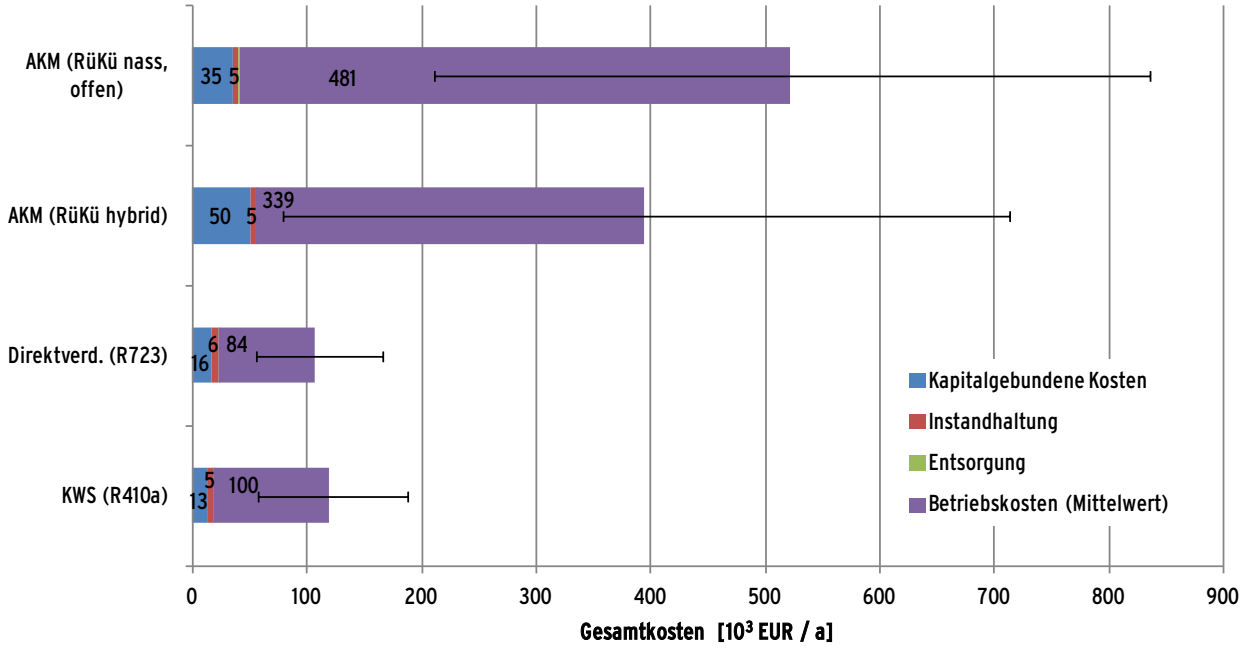
Abbildung 5: TEWI unterschiedlicher Industriekältesysteme unter unterschiedlichen Klimaszenarien



Der Wärmebedarf der Absorptionskältesysteme führt je nach Bewertungsmethode teilweise zu hohen TEWI-Werten. Die Nutzung von Fernwärme eines Kohle-Heizkraftwerkes stellt den ungünstigsten Fall der Betrachtungen dar, wobei diese mit der „Wirkungsgrad-Methode" bewertet wird. Dadurch ergeben sich Emissionswerte, die jene der Vergleichssysteme um mehr als das Fünffache übertreffen. Im günstigsten Fall stellt die Antriebswärme ein reines Abfallprodukt aus z.B. einem industriellen Fertigungsprozess dar oder es wird Abwärme eines BHKWs genutzt, dessen Strom den CO_2-intensiven Strom aus einem Kohlekraftwerk ersetzt (indirekter Anteil TEWI = 0 g CO_2/kWh). In diesem Fall zeigt sich das große Potenzial der Absorptionskälte zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen. Hierbei liegen die Emissionen bei ca. 40% im Vergleich mit den direkt-verdampfenden Systemen mit R723 bzw. bei ca. 33% verglichen mit den Kaltwassersätzen. Hier zeigt sich, dass allgemeingültige Aussagen zur Klimawirkung der verschiedenen Kältesysteme kaum möglich sind. Für jeden individuellen Anwendungsfall sind bei der Wahl des Kältesystems detaillierte TEWI-Betrachtungen zu lokal verfügbaren Wärme- und Stromquellen durchzuführen, prinzipiell und auch differenziert nach Jahreszeiten.

Prozesskälte muss meist ganzjährig bereitgestellt werden. Hierdurch ergibt sich im Gegensatz zur Gebäudeklimatisierung ein hoher Anlagennutzungsgrad und damit ein umgekehrtes Verhältnis von Investitions- zu Betriebskosten. Die Dominanz der Betriebskosten wird in Abbildung 6 deutlich. Dadurch hat eine Variation der spezifischen Kosten für Strom, Wasser und Wärme einen erheblichen Einfluss auf die Gesamtkosten (angedeutet durch die Fehlerindikatoren in der Abbildung). Bei hohen Wärmebereitstellungskosten arbeitet ein AKM-System wesentlich unwirtschaftlicher als vergleichbare Kompressionskältesysteme. Umgekehrt erlauben geringe bzw. keine Wärmebereitstellungskosten in Kombination mit einem wassersparenden Rückkühlsystem (z.B. hybrider Rückkühlturm) einen wirtschaftlicheren Betrieb des Absorbers. Instandhaltungs- und Entsorgungskosten haben bei dieser Betrachtung einen vernachlässigbar geringen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Systeme.

Abbildung 6 : Jahresgesamtkosten untersuchter Kältesysteme für den Bereich Industriekälte – für die Betriebskosten ist jeweils ein Mittelwert zu allen Kosten- und Klimaszenarien angegeben. Das Spektrum der Betriebskosten - verursacht durch die Betrachtung verschiedener Kostenszenarien – wir durch die Fehlerbalken ersichtlich.



Schlussfolgerungen

Die Beispielrechnungen machen deutlich, dass generelle Aussagen zur Klimafreundlichkeit unterschiedlicher Kältesysteme schwierig sind. Ein Vergleich kann immer nur für einen speziellen Anwendungsfall mit den jeweiligen Systemparametern und Randbedingungen gelten. Allerdings erlauben die Ergebnisse folgende Schlussfolgerungen:

- Bei einer ungünstigen Auswahl bzw. Auslegung der Kältesysteme können sehr hohe TEWI-Werte zustande kommen. Die Vermeidung des Einsatzes von Klimakälte sollte bei der Projektierung von Gebäuden und Industrieanlagen oberste Priorität haben.
- Natürliche Kältemittel sind anderen Kältemitteln aus Klimaschutzgründen vorzuziehen.
- Die Berechnungen zeigen, dass von der Energieeffizienz nicht auf die Klimaverträglichkeit der einzelnen Systeme geschlossen werden kann. So gilt für Kompressions-Kältesysteme: die Leckrate im Kältekreislauf hat beim Einsatz fluorierter Kältemittel mit hohem GWP einen entscheidenden Einfluss auf den TEWI. Bei hohen Leckraten hat eine Effizienzsteigerung im Kältesystem (z.B. durch die Ergänzung mit einem Kaltwasserspeicher in der Gebäudeklimatisierung) nur einen geringen Einfluss. Deswegen ist den Leckraten und den Verfahren zur Dichtheitskontrolle bzw. Leckagevermeidung, ein hoher Stellenwert beizumessen (Thema Leckagegrenzwerte, deren Überprüfung und Einhaltung in der Praxis).
- Die Nutzung ohnehin vorhandener und sonst ungenutzter Abwärme kann beim Einsatz einer AKM den TEWI deutlich reduzieren
- Durch Systemkombinationen lassen sich Vorteile der verschiedenen Systeme gezielt besser nutzen: z.B. Verwendung der im Sommer nicht benötigten Abwärme durch eine Absorptionskälteanlage, Nutzung der hohen Effizienz einer Kompressionskälteanlage im

Winterzeitraum (einschließlich freie Kühlung) oder auch die Nutzung von Absorptions-Kompressions-Kaskaden bei tiefen Kältenutztemperaturen.

- Einer weiteren Steigerung der Anlagendichtheit kommt eine hohe Priorität zu. Auch beim Einsatz der meisten natürlichen Kältemittel ist dies aufgrund der sicherheitstechnischen Aspekte relevant. Systeme zur automatischen Feststellung auftretender Lecks (über Prozessparameter) sind weiterzuentwickeln und in Systeme insbesondere mit größeren Füllmengen zu integrieren.

1.3 Substitution von Kompressionskältesystemen durch wärmegetriebene Verfahren

Die Ergebnisse aus dem Vergleich der Kälteerzeugungsverfahren zeigten die Möglichkeit der TEWI-Emissionsreduzierung beim Einsatz von Ab- und Adsorptionskälteanlagen in Verbindung mit bisher ungenutzten Abwärmeströmen.

Ausgehend von den möglichen TEWI-Emissionsminderungspotenzialen wurde untersucht, welche Anteile des Kältebedarfs durch wärmegetriebene Kältesysteme substituiert werden können. Hierbei wurden die Potenziale bei

- Nutzung vorhandener (Prozess-) Abwärme und
- Nutzung der Abwärme aus Erdgas-befeuerten KWK Anlagen (vorzugsweise BHKWs)

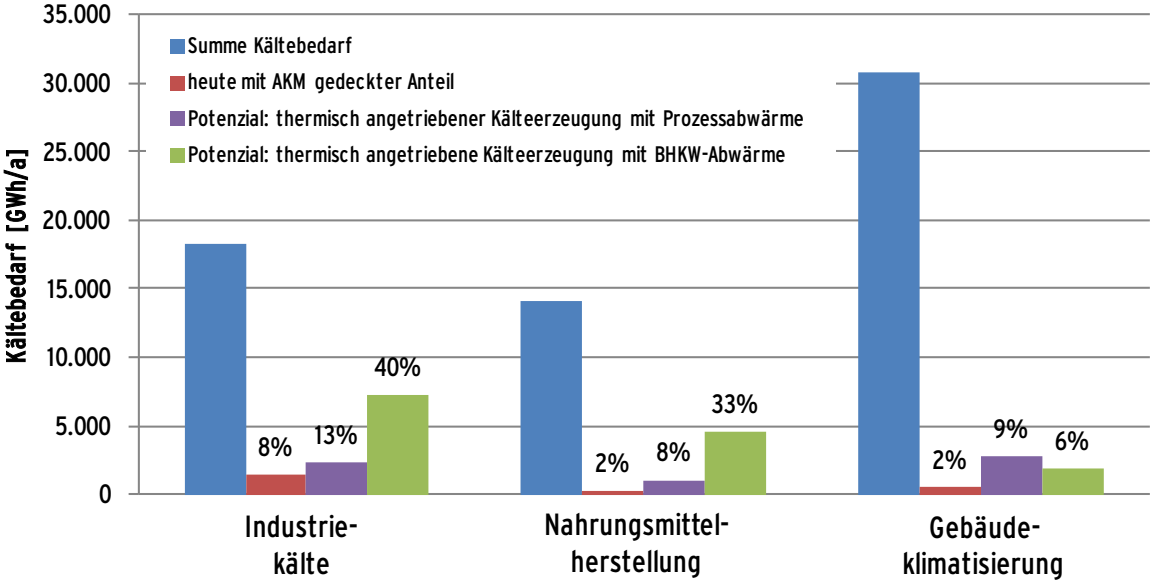
untersucht.

Die Bewertung der Potenziale bezieht technische und wirtschaftliche Faktoren ein. Hierzu zählen:

- Temperaturniveau der Abwärmequelle
- Temperaturniveau der benötigten Kälte
- Saisonales und tageszeitliches Wärmeangebot, Kontinuität
- Saisonaler und tageszeitlicher Kältebedarf, Kontinuität
- Auslastung der Anlagen (Volllaststunden)
- weitere Hemmschwellen, wie z.B. zusätzlicher Platzbedarf
- Planungssicherheit (zukünftige Entwicklung des Kältebedarfs und der Wärmeverfügbarkeit)

Die Bewertung erfolgt für 25 Anwendungsbranchen der Industriekälte und für die Gebäudeklimatisierung. Aufgrund des hohen Anteils der Nahrungsmittelindustrie am Kältebedarf wird diese folgend separat dargestellt. Abbildung 7 stellt die ermittelten Potenziale zur Kältebedarfsdeckung mit wärmegetriebenen Kälteerzeugungsverfahren dar. Erkennbar sind die großen Potenziale insbesondere im Industriebereich. In diesem zeigt sich bereits heute eine vergleichsweise hohe Nutzung von wärmegetriebenen Kälteerzeugungsverfahren. Der hohe Anteil von Bestandsanlagen resultiert überwiegend aus der Chemieindustrie sowie aus Betrieben, die bereits über eine Eigenstromerzeugung am Standort verfügen (z.B. Halbleiterindustrie).

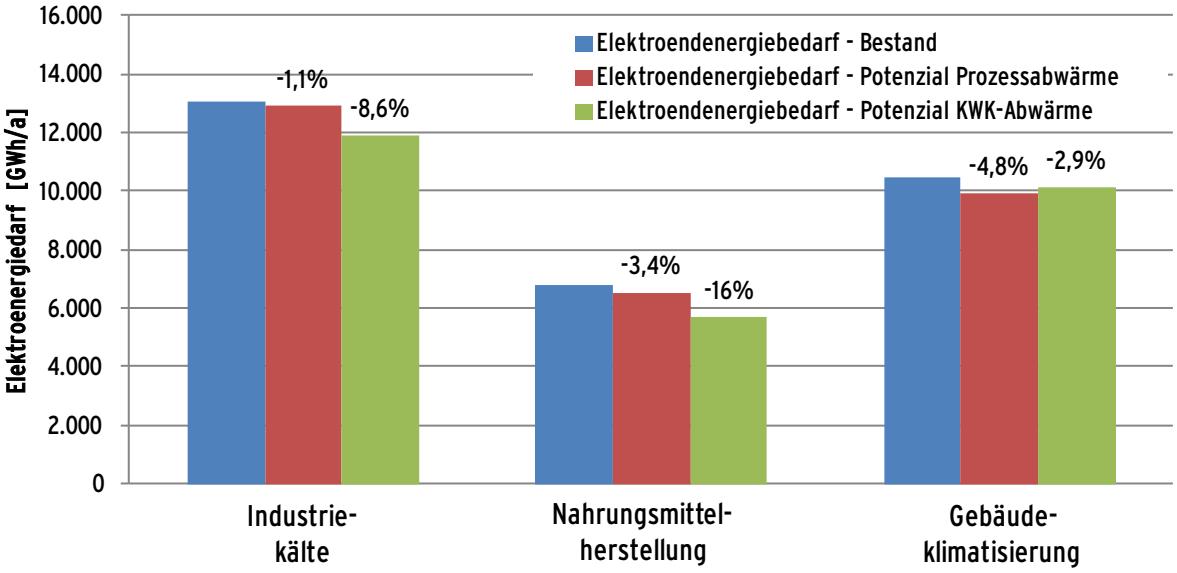
Abbildung 7: Potenziale zur Kältebedarfsdeckung mit wärmegetriebenen Kälteerzeugungsverfahren



Hinsichtlich der erreichbaren Elektroendenergieeinsparungen sind die Eigenverbräuche der wärmegetriebenen Systeme mit dem Mehraufwand für Pumpen und Rückkühlung zu berücksichtigen. Gegenüber guten Kompressionssystemen (Direktverdampfung mit R134a oder R717) im Industriebereich bzw. hocheffizienten Kaltwassersätzen in der Gebäudeklimatisierung werden Elektroendenergieeinsparungen von etwa 58 % im Industriekältebereich bzw. etwa 65 % in der Gebäudeklimatisierung erreicht (vgl. Kapitel 7.3.3.2 und 7.4.3.1).

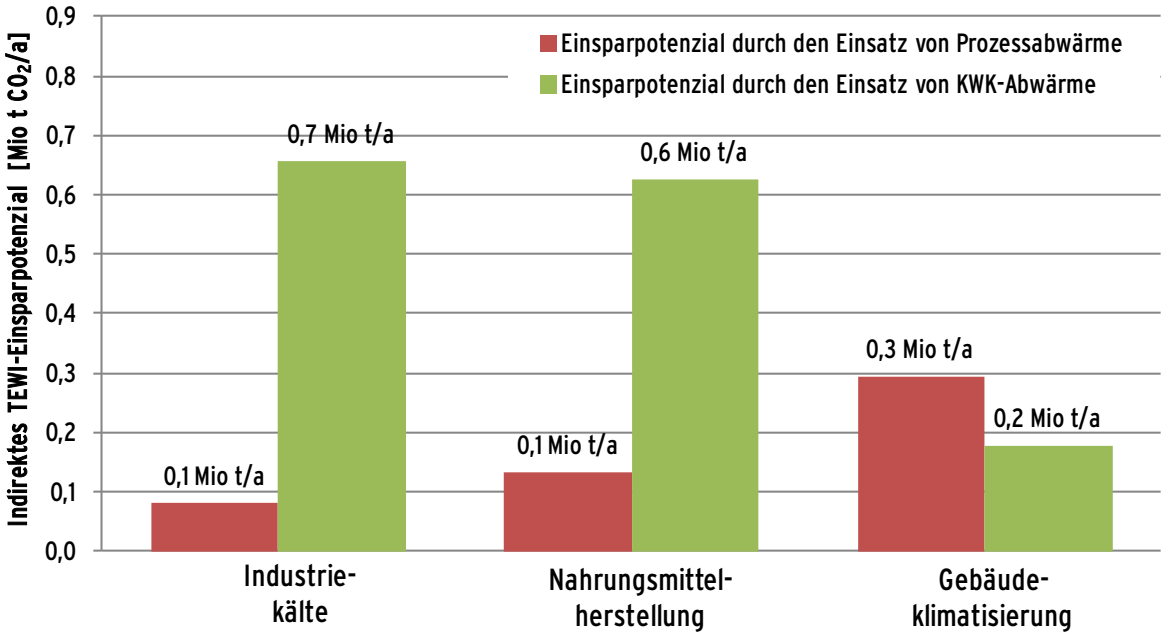
Abbildung 8 fasst die erreichbaren Elektroendenergieeinsparpotenziale zusammen. Weitere Elektroendeinsparungspotenziale ergeben sich ausgehend von einer Reduzierung des Kältebedarfs, insbesondere im Bereich der Gebäudeklimatisierung. Die hohen ermittelten Potenziale hinsichtlich der Kältebedarfssubstitution in der Industriekälte finden sich im Elektroendenergiebedarf nicht wieder. Ursache ist der hohe Anteil der Gasverflüssigung am Elektroendenergiebedarf der Industriekälte. In diesem Prozess wird die Luft selbst zum Kältemittel, so dass dieser nicht durch wärmegetriebene Kältemaschinen ersetzt werden kann. Mit dem Einsatz von mehrstufigen Absorptionskältemaschinen sowie Neuentwicklungen auf dem Gebiet der Sorptionskälte (z.B. direkt-luftgekühlte Absorptionskältemaschinen) erschließen sich zusätzliche Potenziale zur Elektroendenergiesubstitution, welche hier nicht ermittelt wurden.

Abbildung 8: Elektroendenergieeinsparpotenziale durch den Einsatz von wärmegetriebenen Kälteerzeugungsverfahren (Stromeigenbedarf für Pumpen und Rückkühlung wurde berücksichtigt)



Die hieraus hervorgehenden TEWI-Minderungspotenziale – es wird nur der indirekte Anteil betrachtet – sind in Abbildung 9 dargestellt. Im Vergleich zu den indirekten Treibhausgasemissionen der gesamten stationären Kältetechnik entspricht die Summe des Minderungspotenzials von 1,6 Mio. t CO_2/a etwa 4 %, bezogen auf die betrachteten Anwendungen etwa 9 %.

Abbildung 9: Indirekte TEWI-Minderungspotenziale durch den Einsatz von wärmegetriebenen Kälteerzeugungsverfahren (Stromeigenbedarf für Pumpen und Rückkühlung wurde berücksichtigt)



1.4 Hemmnisse und Handlungsempfehlungen

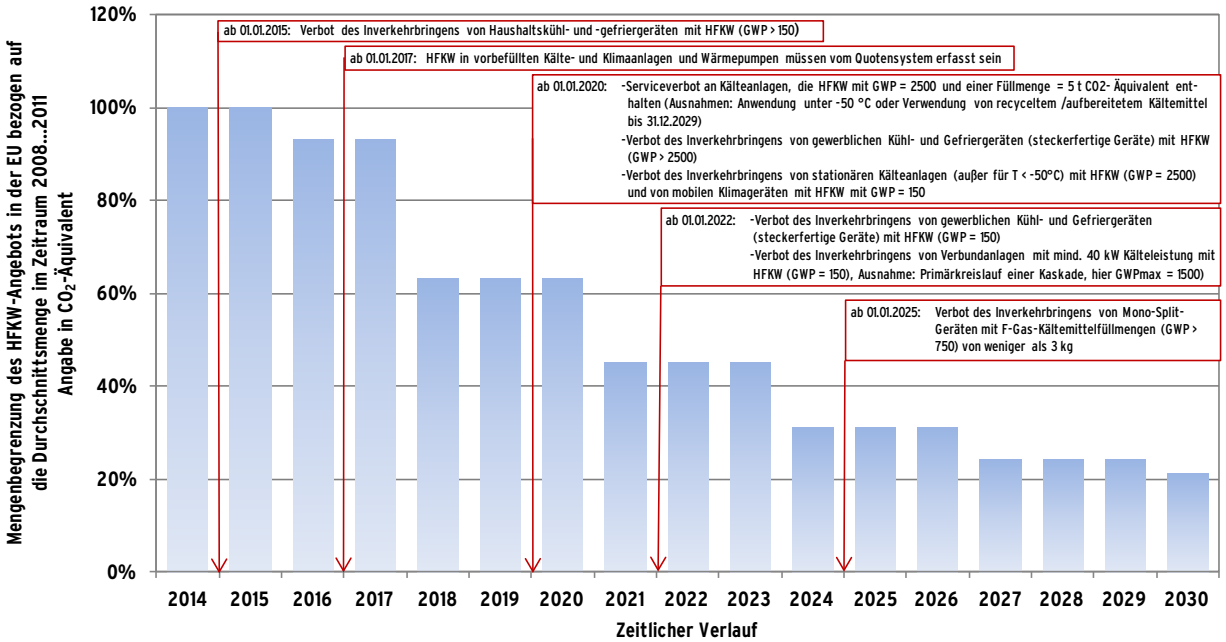
Die Vielfältigkeit klimafreundlicher Kältesysteme lässt keine allgemein gültigen Aussagen zu Hemmnissen zu. Zu den einzelnen Bereichen lassen sich aber wichtige Kernaussagen treffen:

Für die Anwendung natürlicher Kältemittel gibt es nur wenige Anreize. Die entstehenden Mehrkosten durch notwendige Sicherheitstechnik bzw. aufgrund von Einzelanfertigungen werden nicht durch Kosteneinsparung durch eine mögliche höhere Energieeffizienz oder niedrigere Kältemittelkosten aufgewogen.

Der Vorschlag einer Novellierung der F-Gase-Verordnung der Europäischen Kommission enthält unter anderem eine zeitlich degressive Begrenzung der in den Verkehr zu bringenden Mengen an HFKWs (*phase down*). Die Begrenzung erfolgt hierbei anhand des CO_2-Äquivalents (Abbildung 10). Durch diese Maßnahmen ist mit einer erheblichen Verknappung und einer damit einhergehenden Verteuerung der HFKW-Kältemittel insbesondere solcher mit hohem GWP-Wert zu rechnen. Alternativ bietet sich eine nationale GWP-gewichtete Besteuerung der Kältemittel nach den Vorbildern Skandinaviens oder Australiens an.

Dem Einsatz wärmegetriebener Systeme stehen als Hemmnisse insbesondere hohe Investitionskosten, große Bauvolumina, Einkopplung von Abwärmequellen sowie Informationsmangel zum Betriebsverhalten entgegen. Durch entsprechende geförderte technische Entwicklungen, wie z.B. kompakte Wärmeübertrager durch Oberflächenstrukturierung bzw. Oberflächenumwandlungsprozesse, Lösungen zu Absorptions-Kompressionskaskaden-Anlagen, alternativen Stoffpaaren und mehrstufigen Prozessen sind hier positive Ergebnisse hinsichtlich vermehrter Anwendung und wachsender Nachhaltigkeit im Sinne der Energieeffizienz von Wärme und Elektroenergie zu erwarten.

Abbildung 10: Zeitlicher Verlauf der geplanten Einschränkungen der HFKW-Mengen (quantifiziert über CO_2-Äquivalent) durch den Vorschlag zur EU-F-Gase-Verordnung



Informationsdefizite bei Planern bzw. Bauherren sowie bei Betreibern wirken sich negativ auf die Marktdurchdringung alternativer Systeme aus. Die Alternativen sind selten bekannt, zudem wird das Thema Kälte/Kühlung oft erst zu spät in die Planung einbezogen, so dass Systeme wie

die Betonkernaktivierung nicht mehr als Möglichkeit in Frage kommen. Der planer- und betreibergerechten Information kommt daher besondere Bedeutung zu.

Die hohen Investitionskosten von effizienten und nachhaltigen Kältesystemen können auch eine Chance für neue Geschäftsmodelle für den Finanz- und Energiesektor darstellen (Energie-Contracting, Energieeinspar-Contracting). Aufgrund zu erwartender steigender Energiepreise sind hier verschiedene Modelle denkbar, welche für beide Seiten, also sowohl den Betreiber als auch den Investor, Vorteile bringen.

Mit dem Impulsprogramm für gewerbliche Kälteanlagen liegt bereits ein Investitionsförderprogramm vor, welches mit bis zu 35 % Förderquote bezogen auf die Gesamtinvestitionen des Kältesystems gezielt Anlagen mit natürlichen Kältemitteln, Wärmerückgewinnung sowie Komponenten auf dem aktuellen Stand der Technik fördert. In den Jahren 2009 bis 2011 wurden hierdurch bereits 244 Anlagen mit einer installierten Kälteleistung von etwa 144 MW gefördert. Bei etwa 40 % der geförderten Anlagen handelt es sich um Anlagenmodernisierungen. Bezogen auf den Fördermitteleinsatz lagen die CO_2-Vermeidungskosten bei 35 €/t CO_2-Äquivalent (Jörß & Klose 2012).

2 Summary

Refrigeration systems require in sum approximately 14 % of the total electrical energy demand in Germany and are responsible for approximately 5 % of the direct and indirect greenhouse gas emissions. Regarding the national aims for climate protection, these numbers clearly show the need for more climate-friendliness in air handling and refrigeration technologies. The present study provides a base for activities in order to improve the sustainability of these technologies and presents investigations in the fields of industrial refrigeration and building air conditioning.

The study is organised as follows: at first, the cooling demand itemised to industrial sectors will be shown in terms of presently employed technologies. These are characterised by their required energy and some other properties which are necessary for later analyses and evaluations. Second, an overview of sustainable refrigeration systems will be given with a supplementary review of the availability of those systems and single components on the market. Third, by means of dynamic simulations over one year, two special cases of different systems and their variants will be investigated. Based on these results it is possible to draw conclusions related to the sustainability of the systems under consideration and discuss the influence of certain factors on it. Fourth, given heat sources allow to employ thermal-driven refrigeration and air conditioning systems yielding a reduction of primary energy and hence green house gas emissions. The potential for an increased usage of thermal-driven refrigeration systems will be shown and discussed. Finally, barriers and tools will be analysed which possibly prevent and promote the establishment of sustainable refrigeration systems on the market, respectively.

2.1 Net and final energy demand, and relevance for the climate of refrigeration technology

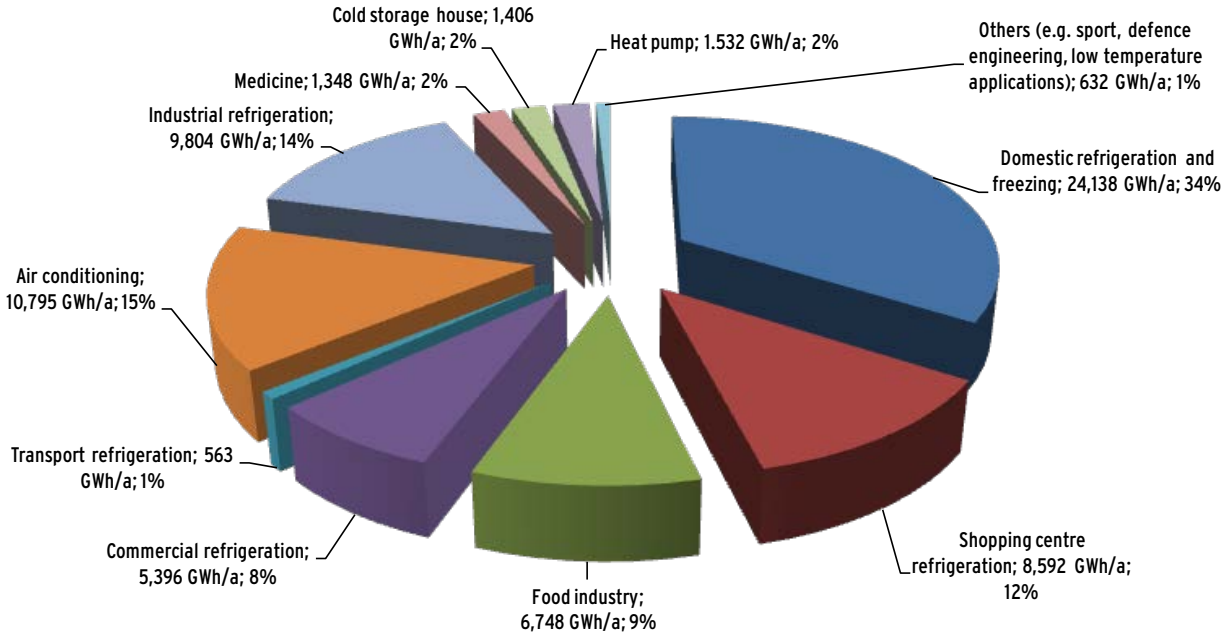
Stationary refrigeration and air conditioning in Germany requires in sum 70 TWh electrical energy in 2008 (Guntram Preuß 2011), corresponding to a share of 13.5 % of the final electrical energy demand (Umweltbundesamt 2012a). The relevance for the climate can be measured in terms of the total equivalent warming impact (TEWI), consisting of a direct share due to refrigerant emissions and an indirect one due to the energy consumption of the system. Given the specific CO_2 emissions for electrical energy of 568 g CO_2/kWh_{el} (Umweltbundesamt 2012a) in 2008, the refrigeration technology produced approximately 40 Mt (Mt: million metric tons) of indirect CO_2 emissions. Supplementary to those, additional 5.6 Mt CO_2–equivalent were released by direct refrigerant emissions (Becken & Plehn 2010). Details can be found in Table 2. Due to large growth rates of new plants in the sector air conditioning in buildings, rising emissions can be expected for the future.

Figure 11 shows the final electrical energy demand of the refrigeration technology itemised to industrial sectors (Guntram Preuß 2011). Of those sectors, the industrial refrigeration systems, food industries, and the stationary air conditioning are relevant for the present study. In Germany, these three sectors have a cooling demand of 63,173 GWh/a (Figure 11) which requires 30 TWh/a electrical energy (5.7 % of total electrical energy demand in Germany) and 3 TWh/a heat (Figure 12). The data base for these numbers will be given in Chapter 5 from page 65 on. A detailed itemisation with respect to industrial sectors will be presented on page 82.

Table 2: Climate-relevant data of stationary refrigeration technology in Germany

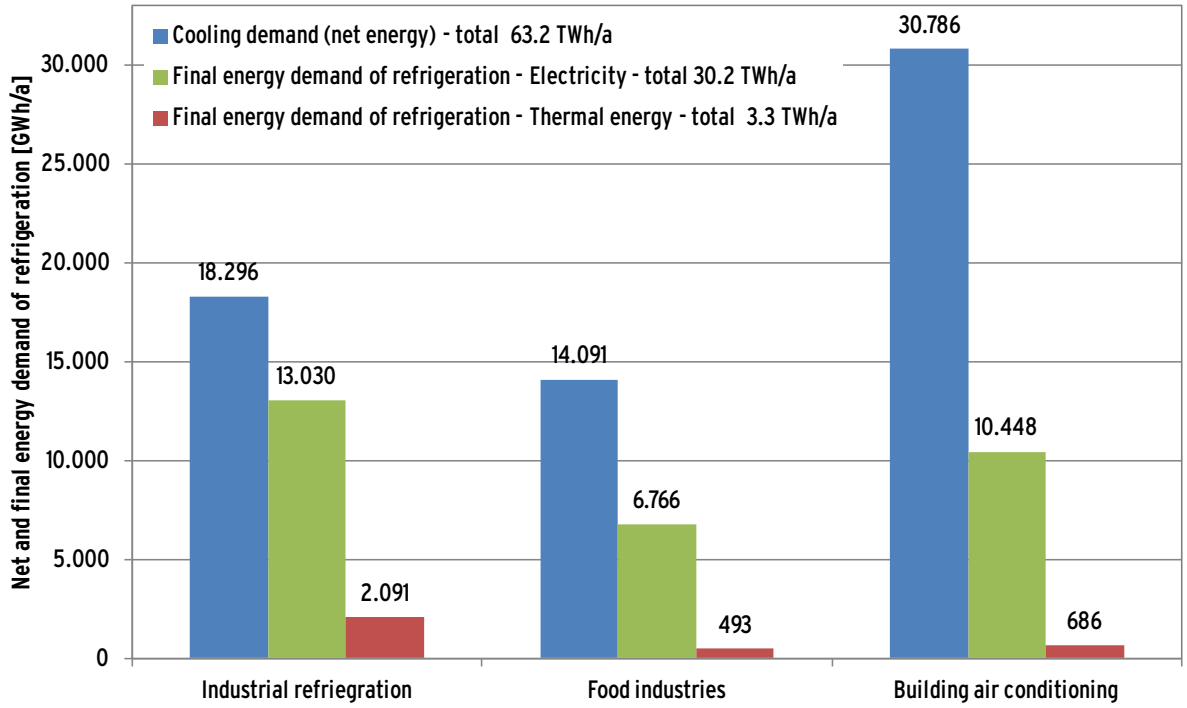
Characteristic number	Value	Comment
Electrical energy demand of stationary refrigeration technology in Germany	70,695 GWh/a	Data base 2008, (Guntram Preuβ 2011),
Share of final electrical energy demand in Germany	13.5 %	Data base 2008, (Guntram Preuβ 2011; Umweltbundesamt 2012a)
Green house gas emissions of stationary refrigeration technology in Germany	45.8 Mt	Data base 2008 for electrical energy (Umweltbundesamt 2012a), Data base 2007 for direct refrigerant emissions (Becken & Plehn 2010)
Share of final green house gas emissions in Germany	4.7 %	Data base 2008
indirect emissions (electrical energy demand)	40.2 Mt (81.6 %)	
Direct emissions (green house effect due to refrigerant)	5.6 Mt (18.4 %)	
Electrical energy demand of industrial cooling and building air conditioning	30,244 GWh/a (42.8%)	Share value based on final electrical energy demand of refrigeration technology in Germany

Figure 11: Share of refrigeration electrical energy demand of various industrial sectors (Guntram Preuβ 2011)



Stationary refrigeration and air conditioning technologies, except commercial refrigeration, produced approximately 800 t direct HFC emissions (Becken & Plehn 2010), corresponding to 1.6 Mt CO_2-equivalent. Considering the emissions of previous years, one can observe an increase of emissions by 15 to 20 % per years between 2002 and 2007.

Figure 12: Cooling demand and final energy demand of refrigeration of particular sectors



Due to the climatic conditions in Germany, the air conditioning sector has only few full load hours. The guideline for energy demand passes for non-residential buildings (BMVBS 2007) declares 500 h for office and 350 h for educational buildings. The simulations of the present authors yielded full load hours of approximately 400 until 520 h. Within the framework of the EvaSolK project, different air conditioning cooling devices, such as chillers, mono-, and multi-split compression type refrigeration plants (CRP), have been investigated in practice and yielded full load hours between 170 and 430 h (Wiemken, Safarik, et al. 2012; Wittig et al. 2012). Beside the climatic conditions, there exists another reason for the low utilised capacity: security factors and – more importantly – prospective extensions of buildings lead to overdimensioned air conditioning systems.

Given the small number of full load hours, the share of direct emissions on the TEWI is significant, considering refrigeration plants with leakage rates of 4 to 7 % (Schwarz et al. n.d.). This finding can be confirmed by the present simulation results. For instance, the application of R410A in chillers leads to 40 % direct emission share of TEWI, for R134a it is 32 %, and for R32 it is 18 %, depending upon the climate zone. In other words, up to 40 % of the green house effect inducing emissions are induced by the leakage of the refrigeration, whilst the rest comes from the energy being required. In direct-evaporating systems, the share is even greater due to the larger amount of refrigerant. With the assumptions given above, R410A has a direct share of up to 70 %. Opposing to the afore mentioned refrigerants, the HFC R1234yf and the natural refrigerants R290, R717, and R718 exhibit an almost negligible share of direct emissions, compared to the indirect ones.

With a better degree of capacity utilisation it is possible to reduce the direct shares. For instance, simulations of industrial chillers working the entire year showed a direct share below 10 %. However, despite the relatively small percentage, the absolute values can be significant, especially in large-scale plants and when refrigerants with a large GWP are employed.

2.2 Evaluation of various techniques to produce coldness

Aim of this section is to evaluate different techniques to produce coldness for building air conditioning with respect to ecological and economical aspects, whereby the impact on the climate is of superior importance. Therefore, energy consumption and emissions of different refrigeration systems are determined, compared with each other, and employed for the simulation of building air conditioning and industrial cooling later on.

Base for the evaluation are dynamical simulations of a non-residential building with its air conditioning system. The simulations cover an entire year in two climate regions (Frankfurt and Hamburg) utilising different climate scenarios (average and extreme summer). For each case, the final energy demand and the green house gas emissions are calculated by using the TEWI approach. The building is modelled as an open-plan office with a squarish floor space of 400 m^2 and a thermal load of 30 W/m^2 which is a typical value for an office. The systems engineering conforms the state of the art (e.g., condensation pressure limited corresponding to saturation temperature of 15 °C using electronic expansion valves, minimal cold water supply temperature of 10 °C). The following systems are considered:

- System with a solar- or district-heat-driven absorption chiller (AbCh) and a chilled ceiling for heat transfer
- Variable refrigerant flow system (VRF) with fan coils for heat transfer
- Compression type refrigerator plants (CRP), (chillers, condensation temperature > 15 °C) with chilled ceiling or fan coils for heat transfer and with/without cold water storage
- Heating ventilation and air conditioning (HVAC) system with liquid sorption (DEC: desiccative and evaporative cooling) employing heat from combined heat and power plant (CHP)

For investigations of industrial cooling, a constant cooling demand of 500 kW at a refrigerant supply temperature of +2 °C is assumed for an entire year. The following systems are considered:

- Chiller (Ch) with a compression type refrigeration plant (CRP)
- Direct-evaporating compression type refrigerant system
- Absorption chiller (ACh) driven by heat from a combined heat and power plant (CHP)

An energetic comparison of the systems is carried out with the final energy demand. Considering the energy content of the energy sources and carriers being employed, one can calculate the demand of primary energy sources. The factors for the primary energy sources are taken from the draft of EnEV 2013 and DIN V 18500-1:2011-12.

In order to evaluate the relevance for the climate of the above-mentioned systems, the TEWI is calculated by using 583 g CO_2/kWh (electricity mixture in Germany of 2010, including all losses) and three different values for thermal energy: 0, 44, and 239 g CO_2/kWh. Heat from the environment is assumed to produce no CO_2. In addition to the indirect contributions to TEWI, direct ones due to leakage of the refrigerant are considered depending upon the system with 4 to 7 % and disposal losses of 30 %.

The examinations provide also economical comparisons of the variants above, containing investment, working, maintenance, and disposal costs. In order to calculate the cost of

operation, different scenarios are included with prices for electricity of 6-25 ct/kWh and for heat of 0-8 ct/kWh.

In the case of building air conditioning, the aspect of thermal comfort is also considered.

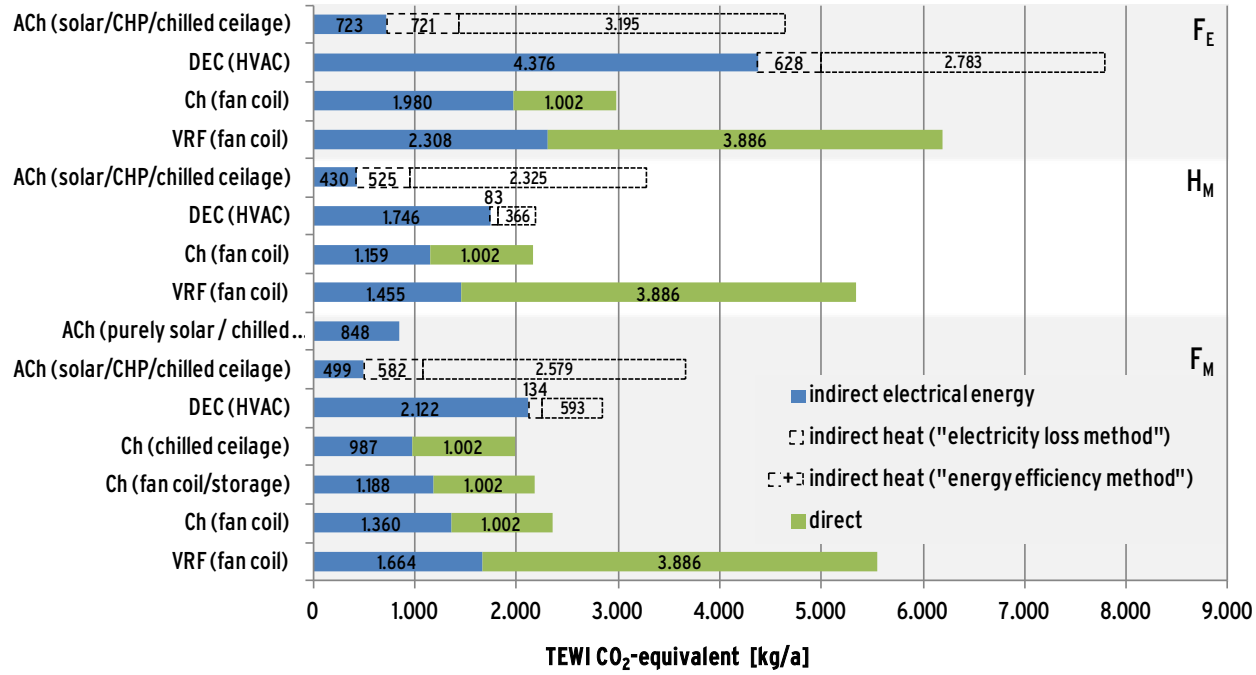
Results for building air conditioning

Regarding the comfort, systems with fan coils yield the best results, whereas chilled ceiling systems are not able to provide sufficient cooling power without condensation at the cold areas in humid and hot days. The humidity control is not possible with chilled ceiling systems. DEC systems proved to be able to control humidity, but leading to exceeding temperatures in hot days, due to a lower limit of supply air temperature restricting the cooling power. Solar refrigeration systems with ACh can be used only with realistically dimensioned collector areas and hot water storages, with either including additional heat source (e.g., district heating) or with a compression type refrigerator as backup. In cases of pure solar cooling, one can often find exceeding temperatures. An energetic and economic comparison is therefore only limited meaningful.

Neglecting pure solar cooling, CRP systems require the lowest amount of primary energy and the VRF system the largest one, which is induced through the relatively low evaporation temperatures (6 °C) and the resulting large desiccative power. An extension of the chiller by a cold-water storage reduces the electrical energy demand by 10 to 12 %, depending upon the climate. Implementing a chilled ceiling instead of fan coils reduces the energy demand by up to 30 % but with limitations of the comfort. HVAC systems with DEC offer only small temperature differences between supply and outlet due to the limit of the supply temperature (>16 °C) with a controlled desiccation. Hence, it is necessary to provide large volumetric flow rates, leading to a large energy demand for the fans. However, such a system might be of advantage in application which already require large flow rates and controlled desiccation.

The small number of full load hours (approx. 460 h for the scenario Frankfurt corresponds to a full load of 5 %) for the operation of refrigeration systems in the observed climate regions, lead to an unexpected picture in terms of the ratio of direct and indirect TEWI emissions (Figure 13). Due to the low operating hours of the facility and the resulting power consumption, the share of indirect emissions, compared with other cooling applications (e.g. commercial refrigeration), is very small. Particularly stand out here the results of the VRF system. Due to the high direct TEWI share (approx. 70 %) the influence of the energy demand (about 30 %) only plays a minor role. It follows for refrigeration systems for building air conditioning that low GWP of the refrigerant as well as a good tightness are crucial for the assessment of climate impacts. The performed calculations and research show that natural refrigerants such as ammonia and propane with their low GWP values have advantages by their low direct TEWI share and may also have energetic advantages when used in compression refrigeration systems compared to HFC refrigerants.

Figure 13: TEWI considerations for various refrigeration systems; itemised by direct and indirect TEWI shares (driving heat given by different allocation methods; see section 4.2.10)

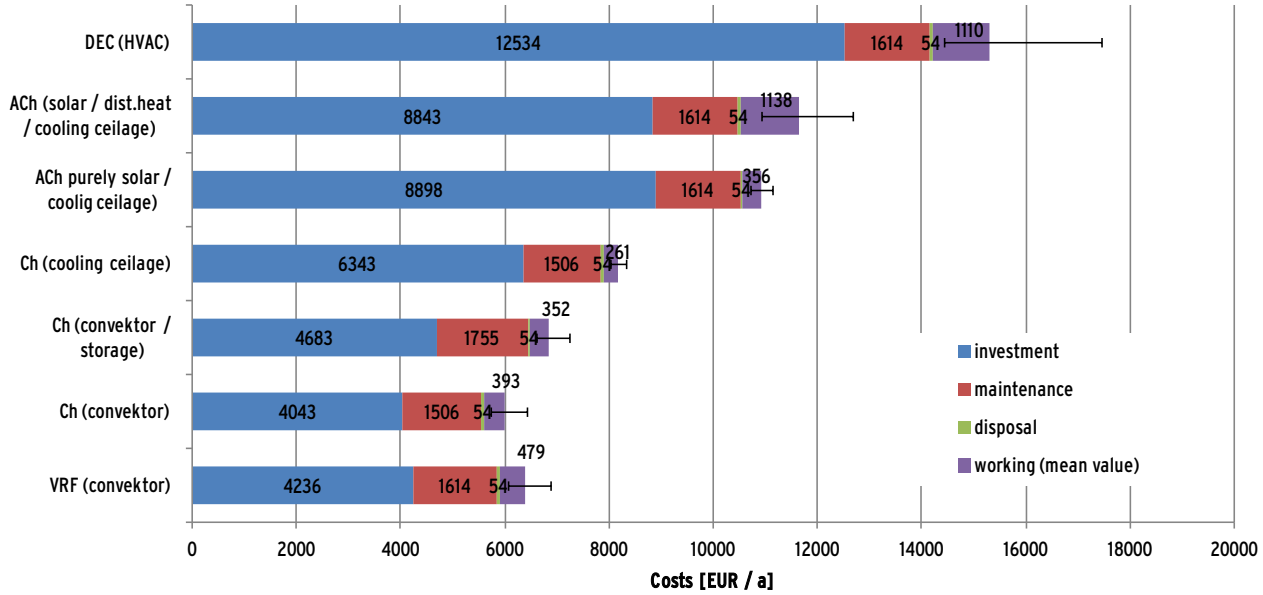


Thermal-driven ACh systems produce very different results depending upon the heat source. In good conditions (waste heat from CHP, considering the mixture of substituted fuel) it is possible to obtain heat with a TEWI of 0 g CO_2/kWh. An indirect share exists only for auxiliary energy such as re-cooling and coldness distribution, but not for the heat source itself. The climate impact of such systems is minimal compared to other ones. Employing district heat from a gas-steam power plant (“electricity loss method” in Figure 13) leads to an indirect TEWI share. However, the sum of direct and indirect shares is still lower than of comparable systems. The opposite is the case when the heat is provided from a coal-fired power station, where extremely large indirect TEWI shares can be observed exceeding most of the comparable systems (“efficiency factor method” in Figure 13).

A comparison of the total costs of the air conditioning systems under consideration reveals that they differ over a wide range (Figure 14). CRP systems are economically better than the other systems for the given case. ACh require over 50 % and DEC systems even 130 % more of the costs of classical refrigeration systems. The major part of the costs are the investment cost, which exceed in the case of ACh and DEC systems the total costs of compression type refrigeration systems. Working costs have only a small share of the total costs, even with different cost scenarios. The reason for this is the small number of full load hours. All refrigeration systems in the climate region under consideration have below 800 h, representing a degree of utilisation below 10 %. Maintenance and disposal cost do not differ significantly and are of minor importance in the comparison.

In this particular case of study, the investment costs of the refrigeration systems dominate all other costs due to low working costs. Alternative system, such as ACh and DEC systems are at a disadvantage due to their larger investment costs, which amortise due to lower working costs only over long time periods or even never.

Figure 14: Final annual costs for air conditioning systems; working costs are are given by the mean value for different scenarios. Their variability is indicated by error bars.



Results for industrial cooling

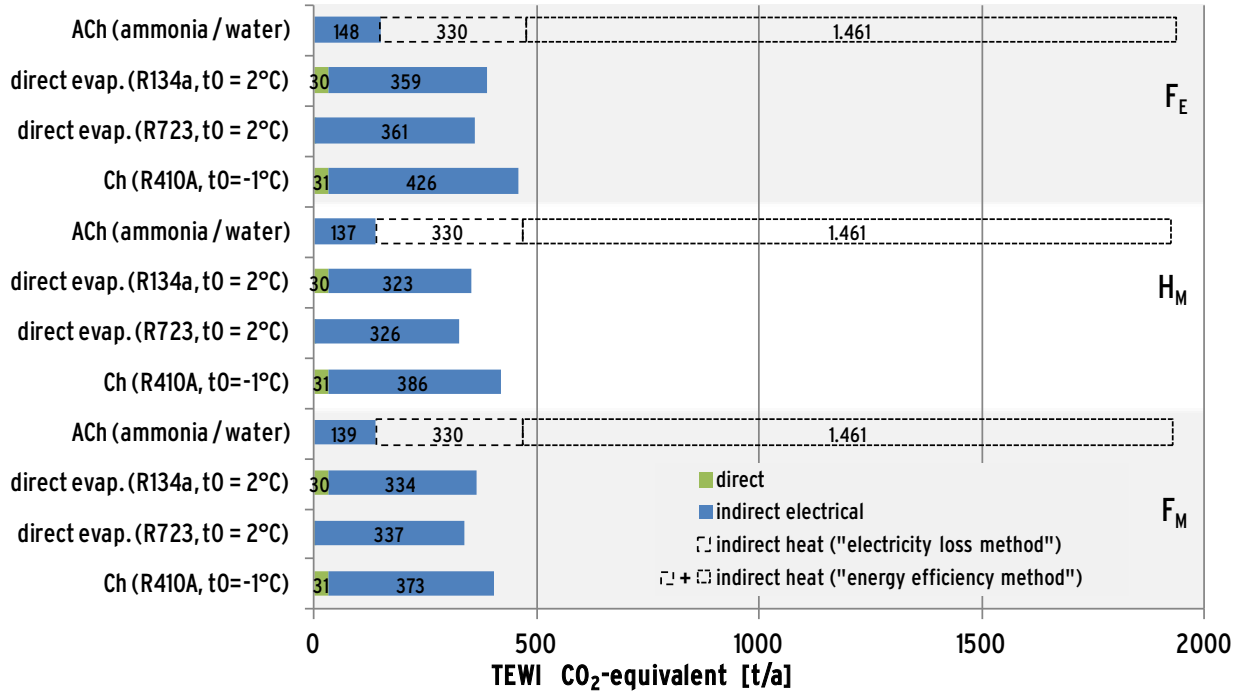
As already observed for the building air conditions, compression type refrigeration systems have the lowest primary energy demand in industrial cooling sector. Both for direct-evaporating and chiller systems there exist requirements regarding the medium temperature at the coldness transfer. Here are chillers at a disadvantage since the additional heat transfer to the refrigerant cycle requires lower evaporation temperatures.

Simulation results showed that natural refrigerants exhibit energetic advantages. Compared to R134a, the refrigerants R290, R717, and R718 require almost the same amount of electrical energy (differences below 1 %). Compared to R410A, natural refrigerants have an increased efficiency by 3 %. In contrast to this, R1234yf requires 10 % more electrical energy. Data sheets of systems on the market indicate that refrigeration systems with natural refrigerant are even better in an energetic comparison than calculated here.

Cooling with ACh is extraordinarily efficient compared to other systems and from an electro-energetic point of view. However, for the given application, ACh require up to 30 times more thermal energy than the CRP electrical one. Hence, ACh have a much larger primary energy demand. The reason for this is that the heat ratio can be improved only in a limited range for small temperature differences.

Figure 15 shows the TEWI emissions for industrial refrigeration systems. The direct emissions of the CRP are of less importance than it was for building air conditioning. The reason is the large number of full load hours. With the assumptions been made, the direct-evaporating system with R723 has the lowest TEWI emissions and also the application of the fluorinated R134a has advantages over indirect-evaporating chillers. These results, however, depend strongly on the particular case (e.g., refrigerant leakage rates).

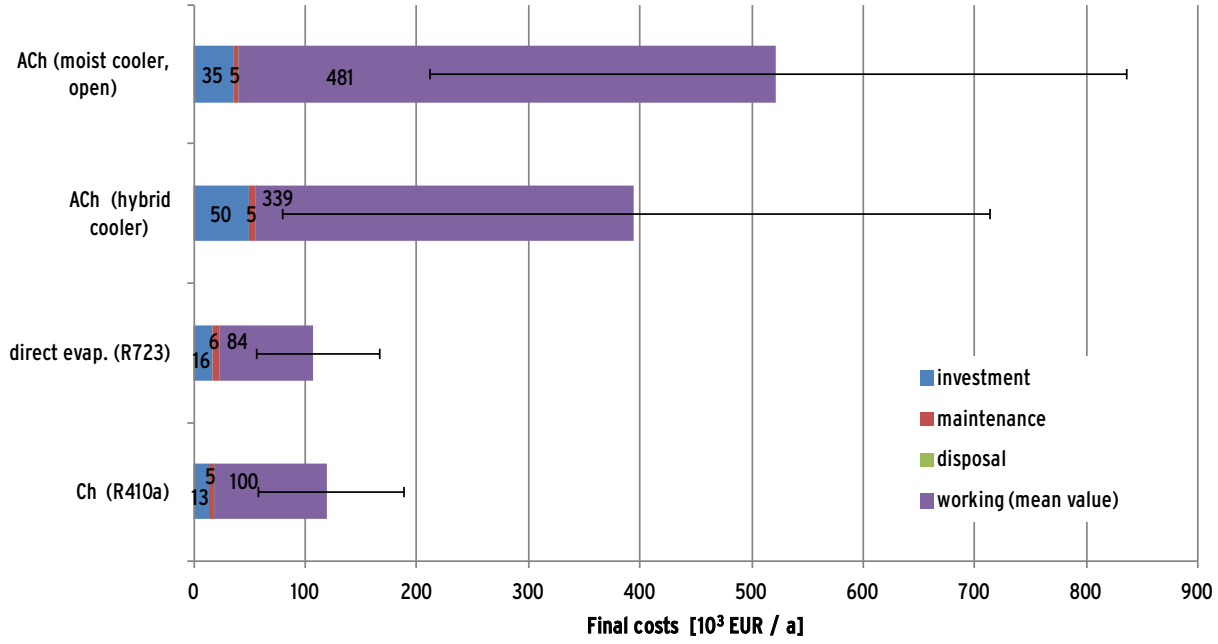
Figure 15: TEWI of industrial refrigeration systems and various climate scenarios



The heat demand of ACh can lead to large TEWI values, depending upon the heat source. Hereby, district heat from a coal-fired power station is the worst scenario leading to five times larger TEWI than of comparable systems, evaluated with the “efficiency factor method”. In the best case, the heat source is, e.g., some waste heat from industry or a CHP, whose electrical power is employed to substitute CO_2-intensive power from a coal-fired power station (indirect TEWI: 0 g CO_2/kWh). In the latter case, ACh exhibit their full potential to reduce green gas emissions. The emissions are approximately 40 % of direct-evaporating R723 systems and 33 % of chillers. However, this comparison also shows that a general statement regarding the climate impact of different systems is hardly possible. Moreover, for each individual application it is necessary to conduct detailed TEWI investigations considering refrigerants, heat and electrical power sources, and, in principle, also the time of the year.

Process cooling is usually required during the entire year, which leads to a large degree of utilisation and to a reciprocal ratio of investment to working costs – in contrast to building air conditioning. The dominating effect of the working costs is visible in Figure 16, which leads to an increased influence of the variability of the costs for electricity, water, and heat on the total costs (indicated by error bars). Large costs for heat make ACh less economical than comparable CRP, but otherwise at low or negligible heat costs in combination with water-saving recooling systems (e.g., hybrid cooling tower), ACh are at an advantage. The costs for maintenance and disposal have a negligible effect on the cost effectiveness of the systems.

Figure 16 : Final annual costs of industrial refrigeration working costs are are given by the mean value for different scenarios. Their variability is indicated by error bars.



Conclusions

The simulations showed that a general statement regarding the sustainability of different refrigeration systems is difficult. A comparison is only possible for a particular case with its parameters and boundary conditions. However, the results allow the following conclusions:

- With an adverse choice/design of the refrigeration system, extremely large TEWI values can occur. Avoiding air conditioning cooling should have highest priority when designing new buildings or industrial plants.
- Natural refrigerant shall be favoured over others due to climate protection reasons.
- Good energy efficiency does not necessarily lead to good climate protection. E.g., CRP with fluorinated refrigerant of large GWP: refrigerant leakage increases TEWI; at large leakage rates other improvements of the system efficiency (e.g., cold-water storage) have only small effect. Hence, tightness, leakage rate and avoiding leakages are very important
- Utilisation of presently unused waste heat can decrease the TEWI significantly with ACh.
- Combinations of systems to create advantages: e.g., utilisation of waste heat with a ACh in the summer, and employing large efficiency of CRP in the winter (incl. free cooling) or utilisation cascades of absorption-compression at low temperatures.
- An increased tightness of the system has large priority; also for natural refrigerants for security purposes. Development of automatic devices asserting leakages (via process parameters) and implementation into large systems

2.3 Substitution of compression type refrigeration by heat-driven systems

The results of the comparison of different refrigeration techniques showed the potential to reduce the TEWI of ACh in conjunction with presently unused waste heat. Based on the

potential to reduce the TEWI, the share of systems which can be substituted by ACh is studied by means of the utilisation of

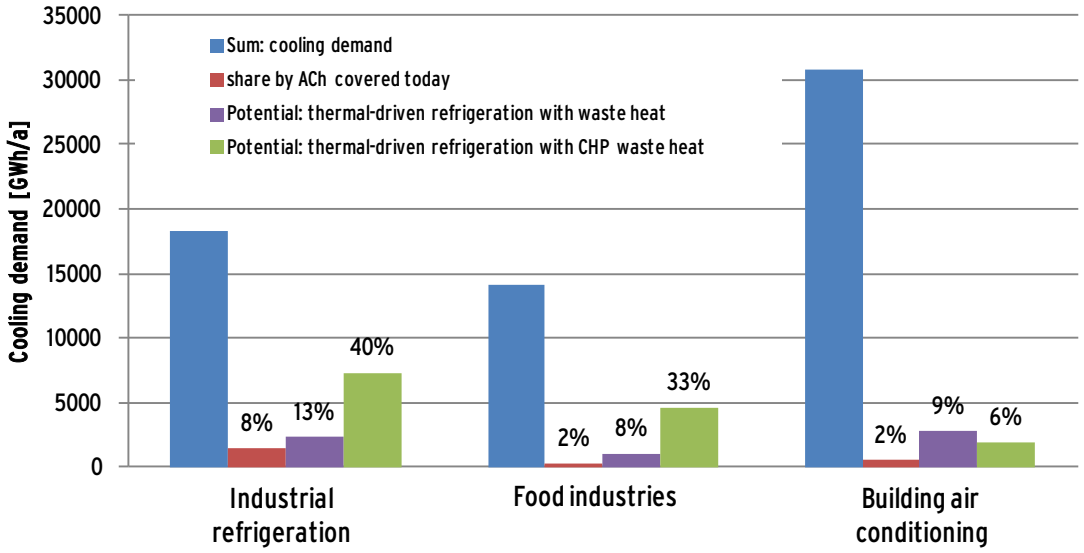
- Present (process) waste heat and
- Waste heat of natural-gas-fired CHP.

The evaluation of the potential considers technical and economical factors. These are:

- Temperature level of waste heat
- Temperature level of required coolness
- Seasonal and temporal heat supply, continuity
- Seasonal and temporal cooling demand, continuity
- Utilisation demand of the system (full load hours)
- Other inhibitions, e.g., additional floor area demand
- Planning reliability (prospective cooling demand and heat supply)

The evaluation is carried out considering 25 sectors of industrial refrigeration and building air conditioning. Owing to the large food industry share of the cooling demand it is shown separately. Figure 17 presents the potentials to cover the cooling demand by heat-driven techniques. One can see that there are large potentials in the industrial sector, where already today a relatively large share of heat-driven systems can be found. The large share of already existing systems can be found in chemical industries and factories having their own electrical power supply (e.q., chip industries).

Figure 17: Potentials for covering cooling demand by means of heat-driven refrigeration techniques



Regarding the savings of electrical energy, the consumption of auxiliaries in heat-driven (pumps, coolers) has to be considered. Compared to good CRP (direct-evaporating R134a or R717) in industry or extremely efficient chillers in buildings air conditioning, electrical energy savings of up to 58 % in industry and 65 % in buildings air conditioning can be obtained (see sections 7.3.3.2 and 7.4.3.1).

Figure 18 summarises the potentials of saving electrical energy. The large potentials regarding the substitution of refrigeration demand in industry do not reflect in the demand for electrical

energy. The reason for this is the large share of gas liquefaction of the total demand for electrical energy in industrial refrigeration. Hereby, air itself is the refrigerant, why this process cannot be substituted by a heat-driven system. The resulting indirect TEWI reductions potentials are displayed in Figure 19.

Figure 18: Potentials to save electrical energy by means of heat-driven refrigeration systems (auxiliary energy of pumps and cooler are taken into account)

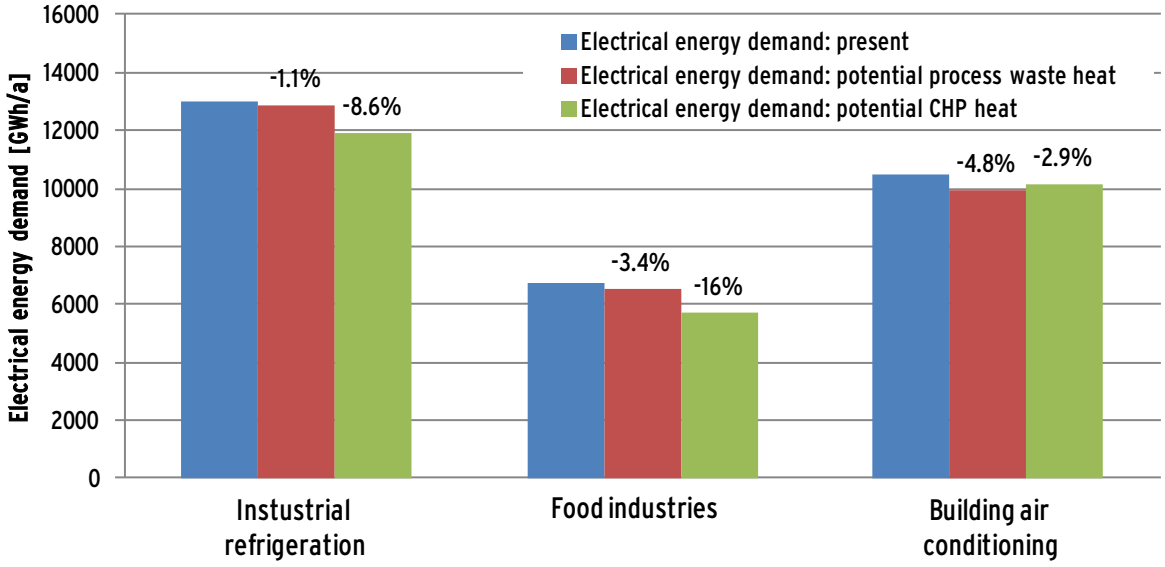
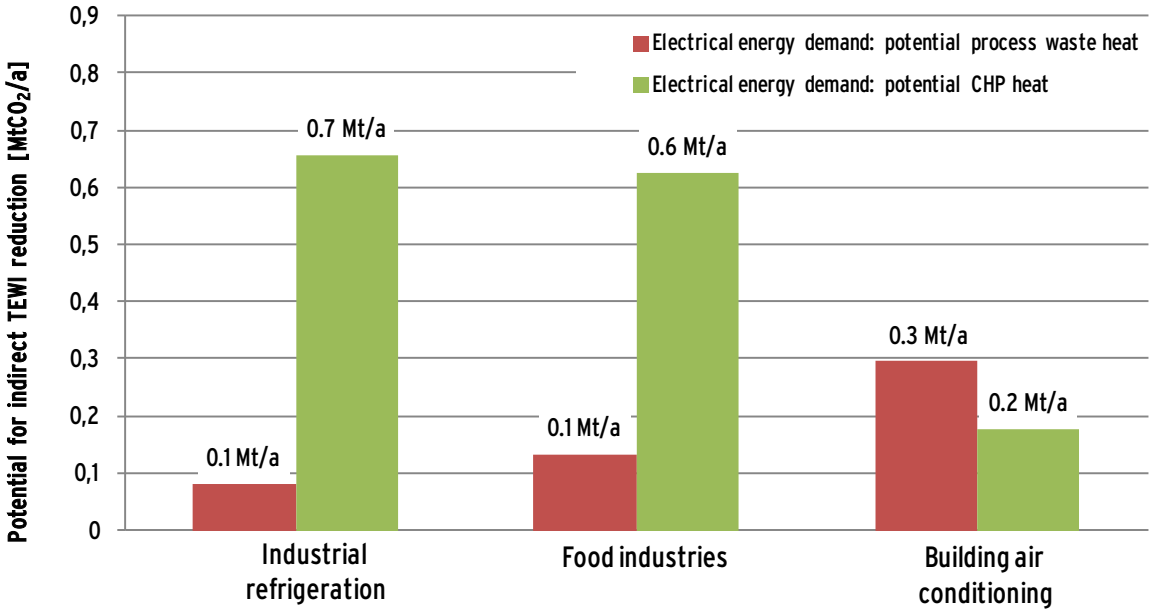


Figure 19: Indirect TEWI reduction potentials by means of head-driven refrigeration systems (auxiliary energy of pumps and cooler are taken into account)



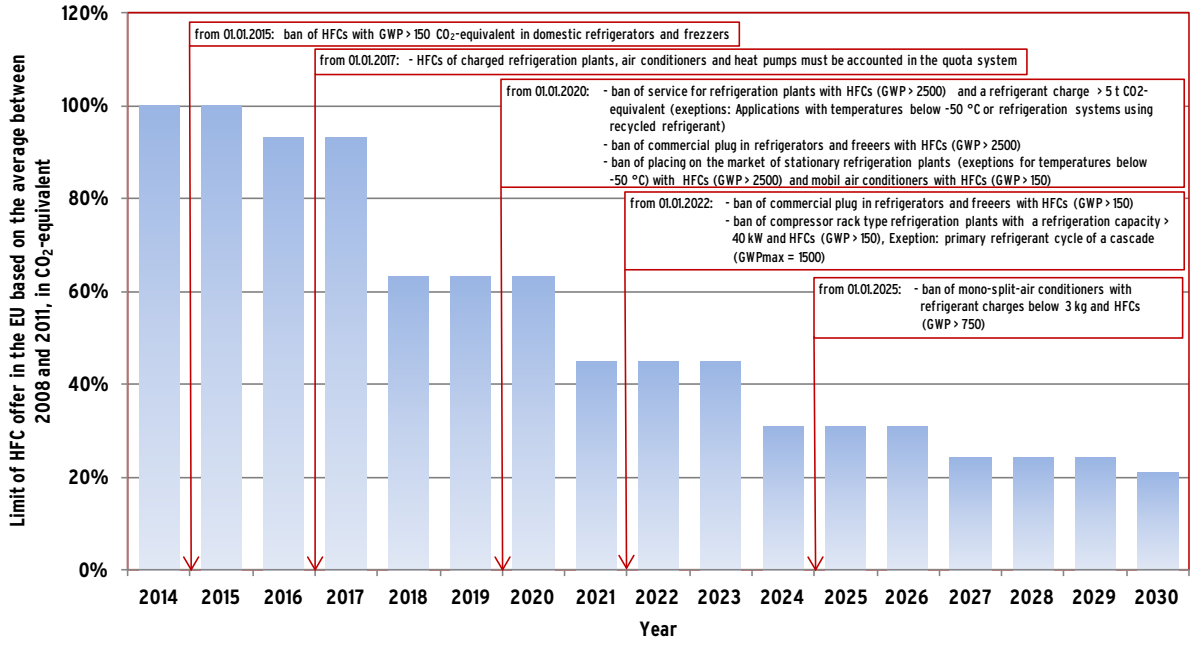
2.4 Barriers and recommendations

The variability of sustainable refrigeration systems does not allow a general statement regarding barriers. However, it is possible to give some important points:

For the application of natural refrigerants there exist only few stimuli. The increased costs for the required security installations and for custom-made items are not compensated by possibly

larger energy efficiency or lower costs for refrigerants. The proposal of an amendment of the decree for fluorinated gases given by the European Union contains among others the temporal declining limitation of the amount of HFCs (see Figure 20). The limit is evaluated by means of the CO_2 equivalent. These measures will lead to a dramatic reduction and with it to an increase of the price of HFC refrigerants – especially for those with a large GWP. Alternatively, it is possible to establish national GWP-weighted taxes on refrigerants following Scandinavia and Australia.

Figure 20: Temporal development of the planned limitation of HFC amount (defined by CO_2-equivalent) by EU decree on fluorinated gases



Barriers for the application of heat-driven system are large investment cost, large-volume systems, coupling of waste heat, and lack of information of the operating behaviour. Due to grant-supported development of, e.g., compact heat exchangers with structured surfaces, solutions for absorption-compression systems, alternative fluid combination, and multiple-staged processes, positive results are expected regarding increased applications and better sustainability in terms of efficiency of heat and electrical energy.

There is an information deficiency with planners, house-builders, and operators leading to a retarded establishment of alternative systems. These alternatives are often unknown and cooling itself is often considered too late, why system such as concrete core activation cannot be implemented any more. Planner- and operator-optimised information distributions have an especial relevance.

The large investment cost of efficient and sustainable refrigeration system shall be also understood as business model for the financial and energy sector (energy contracting, energy-saving contracting). Due to expectable rising energy prices, there are several business models cogitable, leading to advantages for both operator and investor.

With the “Impulsprogramm” there exists a support programme for the financial and energy sector, which supports systems with natural refrigerants, heat recovery, and components of the state of the art with up to 35 % of the total investment. In 2009-2011, 244 facilities with an

installed cooling power of approximately 144 MW have been supported. Approximately 40 % of those facilities were refurbishments. Based on the grants being given, there have been cost for the avoidance of CO_2 of 35 €/t CO_2 equivalent (Jörß & Klose 2012).

3 Einleitung

Die Kältetechnik in Deutschland weist einem Anteil von etwa 14% am nationalen Elektroenergiebedarf sowie von etwa 5% an den nationalen Treibhausgasemissionen - bezogen auf das CO_2-Äquivalent und unter Berücksichtigung direkter und indirekter Emissionen - auf. Mit diesen Anteilen besteht vor dem Hintergrund der Umsetzung der Klimaschutzziele ein Handlungsbedarf zur Erhöhung der Klimafreundlichkeit der Klima- und Kältetechnik in Deutschland.

Die vorliegende Studie dient als Grundlage für Aktivitäten und Maßnahmen zur Verbesserung der Klimafreundlichkeit der Kältetechnik. Sie umfasst detaillierte Analysen der Bereiche der Industriekälte (Prozesskühlung u.a.) und Gebäudeklimatisierung.

Ausgangspunkt stellt eine Aufschlüsselung zum Kältebedarfs und dessen Deckung bezüglich der einzelnen Branchen dar. Diese in Kapitel 5 (Seite 65) dargestellte Aufschlüsselung wird durch charakterisierende Merkmale, wie Lastgänge oder notwendige Kälteträgertemperaturen, welche für spätere Analysen und Bewertungen von Bedeutung sind, ergänzt. Hierfür werden Daten aus unterschiedlichen Quellen herangezogen, verglichen und auf Plausibilität geprüft.

Im Anschluss folgt in Kapitel 6 (Seite 84) ein Überblick über mögliche Systeme zur Klimatisierung und Kältebereitstellung. Hierbei werden grundlegende Vor- und Nachteile benannt. Für Kompressionskältesysteme wird der Einfluss der Kältemittel auf den Prozess, erreichbare Leistungszahlen sowie ausgehende Treibhauspotenziale diskutiert. Der Abschnitt umfasst ferner eine Marktübersicht zu Komponenten und Kaltwassersätzen für natürliche Kältemittel sowie ein Überblick über realisierte Kältesysteme mit natürlichen Kältemitteln. Neben den Kompressionskältesystemen wird auch der Bereich sorptiver, wärmegetriebener Kältesysteme betrachtet. Neben der Vorstellung und Diskussion verfügbare Systeme, erfolgen auch hier eine Recherche zu am Markt verfügbaren Anlagen sowie eine kurze Darstellung ausgeführter Anlagensysteme.

In Kapitel 7 (Seite 109) werden für die zwei Einsatzfälle der Gebäudeklimatisierung und der Industriekältebereitstellung unterschiedliche Systemvarianten anhand von dynamischen Anlagensimulationen über einen Jahreszeitraum untersucht. Ausgehend von den Berechnungsergebnissen werden Einflussfaktoren auf Energiebedarf und Klimafreundlichkeit diskutiert und Schlussfolgerungen zu geeigneten Maßnahmen für eine klimafreundliche Anlagentechnik benannt.

Bei vorhandenen Abwärmequellen bieten thermisch getriebene Kälte- und Klimasysteme die Möglichkeit zur Primärenergieeinsparung und zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen. Die Ausweitung der Nutzung thermisch angetriebener Kältesysteme wird anhand unterschiedlicher Annahmen in Kapitel 8 (Seite 159) für die ausgewählten Bereiche untersucht und das mögliche Potenzial dargestellt.

Kapitel 9 (Seite 176) schließt die Studie mit einer Analyse von Hemmnissen und Werkzeugen zur Etablierung nachhaltiger Kältesysteme am Markt ab. Hierbei werden gesetzliche, sicherheitstechnische und wirtschaftliche Hemmnisse betrachtet.

Auf den anschließend folgenden Seiten des Kapitels 4 werden die untersuchten Bereiche eingegrenzt sowie für die Studie relevante Begriffen und Kenngrößen erklärt. Hierbei wird

insbesondere auf Kennzahlen, die als Grundlage in die Bewertung der Systeme unter dem Gesichtspunkt der Klimafreundlichkeit einfließen, eingegangen.

4 Definition von Kenngrößen und Kennzahlen – Eingrenzung der Bereiche

4.1 Definition und Eingrenzung der untersuchten Branchenbereiche

Die Studie befasst sich mit der klimafreundlichen Kälteversorgung in Deutschland in den Anwendungsbereichen Industrie und Gebäudeklimatisierung. In der Literatur werden mit den Begriffen *Industriekälte* und *Gebäudeklimatisierung* unterschiedliche Anwendungen beschrieben. Trotzdem wird im Bereich der Industriekälte vielfach die Klimatisierung zugehöriger Gebäude (Bürogebäude und Produktionsstätten) einbezogen, teilweise wird diese jedoch auch separat erfasst. In der vorliegenden Studie wird der gesamte Klimabereich der Industrie der Gebäudeklimatisierung zugerechnet. Ähnliche Unschärfen in der Zuordnung sind im Dienstleistungssektor zu beobachten. Einzelne Autoren schreiben die Klimatisierung in diesem Bereich der Gebäudeklimatisierung zu, andere betrachten diese als Gewerbekälte.

Soweit möglich werden die Anwendungsbereiche voneinander abgegrenzt, jedoch sind durch nicht ausreichende Definitionen in der gesichteten Literatur Überschneidungen nicht auszuschließen.

4.1.1 Industriekälte

Die Industriekälte umfasst den Kältebedarf der Industrie für folgende Anwendungen:

- Prozesskühlung,
- Lagerung von Ausgangs-, Zwischen- und Endprodukten,
- Klimatisierung von Großrechnern für den industriellen Bereich sowie der Hauptanwendung als Webserver,
- Schaltschrankklimatisierung.

Die folgenden Anwendungen werden jedoch nicht der Industriekälte zugeschrieben:

- Klimatisierung von Reinräumen, Fertigungshallen (Zuordnung zu Gebäudeklimatisierung, Industrie), wenn nicht anderes angegeben bzw. wenn eine Auftrennung aufgrund der Daten möglich ist
- Klimatisierung von Bürogebäuden des Industrie- und Handelssektors (Zuordnung zu Gebäudeklimatisierung, Industrie bzw. Gebäudeklimatisierung, Gewerbe, Handel und Dienstleistung (kurz GHD))
- Klimatisierung von Verkaufsflächen (Zuordnung zu Gewerbekälte), soweit trennbar vom Bereich GHD
- Kühlung von Lagerräumen für Endprodukte in unmittelbarer Nähe zum Verkauf (Zuordnung zu Gewerbekälte)
- Klimatisierung von Serverräumen in Bürogebäuden (Zuordnung zu Gebäudeklimatisierung), soweit sie nicht im Bereich der Schaltschrankkühlung berücksichtigt sind.

4.1.2 Gebäudeklimatisierung

Die Gebäudeklimatisierung umfasst die Klimatisierung von:

- Bürogebäuden

- Serverräumen und Rechenzentren
- Klimatisierung von Reinräumen und Produktionsstätten

Folgende Bereiche werden im Rahmen der Studie genannt, jedoch nicht der Gebäudeklimatisierung zugerechnet:

- Klimatisierung von Gaststätten und Hotelbetrieben (Zuordnung zu Gewerbekälte)
- Klimatisierung von Verkaufsflächen (Zuordnung zu Gewerbekälte)

4.2 Definition von Kenngrößen und Kennzahlen

Im Folgenden werden Kenngrößen und Kennzahlen definiert, auf welche im Bericht an verschiedenen Stellen Bezug genommen wird. Zu einigen Größen sind in der Literatur unterschiedliche Angaben zu finden. In diesen Fällen erfolgt eine begründete Festlegung.

4.2.1 Primärenergiebedarf

Der Primärenergiebedarf umfasst neben dem Energiegehalt eines Energieträgers (z.B. Gas, Wärme oder Strom) den zusätzlichen Energieaufwand aller Vorketten zur Energieumwandlung bzw. Energiegewinnung. Die Berechnung erfolgt auf Basis der Endenergie sowie zugehöriger Primärenergiefaktoren entsprechend der geplanten Novellierung zur Energieeinsparverordnung 2009[4] (EnEV 2009; Robbi & Sander 2012).

4.2.2 Primärenergiefaktoren

Der Primärenergiefaktor ist der Quotient aus Primärenergie und Endenergie. Er ist abhängig vom Energieträger. Die in Tabelle 3 dargestellten Werte gelten entsprechend der DIN V 18599-1:2011-12, anwendbar ab Inkrafttreten der EnEV 2013. Die primärenergetische Bewertung der Fernwärmebereitstellung aus industrieller Abwärme wurde entsprechend AGFW-Arbeitsblatt FW 309 Teil 1 vorgenommen (AGFW 2010). Bei den Angaben zum Primärenergiefaktor werden zwei Fälle unterschieden: *insgesamt* und *nicht erneuerbarer Anteil.* Der Zahlenwert des Primärenergiefaktors ist für fossile Energieträger in beiden Fällen identisch, bei erneuerbaren Energieträgern unterscheiden sich diese je nach Bewertung des Energieträgers.

Zur Veranschaulichung soll dies am Beispiel des Brennstoffs Holz erklärt werden. Dieser weist einen Bereitstellungsaufwand auf, der die aufgewendeten Energien für Holzernte, Holztrocknung, Zerkleinerung und Transport berücksichtigt. Dieser Aufwand ist in beiden Anteilen mit 0,2 einbezogen. Um die Effizienz der Energieumwandlungskette zu berechnen, ist der Energiegehalt des Brennstoffes entsprechend zu bewerten. Dies erfolgt mit dem *Insgesamt*-Anteil, der in diesem Beispiel aufgrund der vollständigen Umwandlung in Wärme den Wert 1,2 annimmt.

Für die volkswirtschaftliche Bewertung des Energieeinsatzes, für die der Primärenergiefaktor die Funktion eines Kostenparameters annimmt, wird ermittelt, wie viel nicht erneuerbare Energie investiert werden muss. Der erneuerbare Energieinhalt wird im *nicht-erneuerbaren-*

[4] Erscheint laut www.enev-online.de voraussichtlich als EnEV2014 (Stand 15.08.2013)

Anteil mit 0 bewertet. Das heißt, dieser Anteil umfasst nur den Energieinhalt fossiler Energiequellen bzw. Kernbrennstoffen sowie den Anteil für die Bereitstellung der Brennstoffe (für das Beispiel Holz ergibt sich der Faktor 0,2).

Ziel der vorliegenden Studie ist die Bewertung der Kältesysteme anhand ihrer Umweltfreundlichkeit (Energieverbrauch und Gesamttreibhausgasausstoß) und der Kostenintensität. Der Einfluss einer zunehmend durch regenerative Energiequellen geprägten Energieversorgung ist daher zu berücksichtigen. Um diese Effekte in die Bewertungen einzubeziehen, werden in der vorliegenden Studie die Primärenergiefaktoren für den Fall *nicht-erneuerbarer-Anteil* verwendet.

Tabelle 3: Primärenergiefaktoren entsprechend der DIN V 18599-1:2011-12 (Robbi & Sander 2012)

Endenergieträger		Primärenergiefaktor	
		insgesamt	nicht erneuerbarer Anteil
Brennstoffe	Heizöl EL	1,1	1,1
	Erdgas H, Flüssiggas	1,1	1,1
	Steinkohl	1,1	1,1
	Braunkohle	1,2	1,2
Biogene Brennstoffe	Holz	1,2	0,2
	Biogas	1,5	0,5
	Bioöl	1,5	0,5
Nah- und Fernwärme aus KWK	fossile Brennstoffe	0,7	0,7
	erneuerbare Brennstoffe	0,7	0,0
Nah und Fernwärme aus Heizwerken	fossile Brennstoffe	1,3	1,3
	erneuerbare Brennstoffe	1,3	0,1
Nah- und Fernwärme auf Basis industrieller Abwärme	Bereitstellungsaufwand, wenn nicht im Detail bekannt	0,4	0,4
Strom	allgemeiner Strommix	2,8	2,4
	Verdrängungsstrommix	2,8	2,8
Umweltenergie	Solarenergie	1,0	0,0
	Erdwärme, Geothermie	1,0	0,0
	Umgebungswärme, Umgebungskälte	1,0	0,0
Abwärme innerhalb des Gebäudes		1,0	0,0

4.2.3 Endenergiebedarf

Der Endenergiebedarf ist die vom Nutzer eingekaufte Energie in der jeweiligen Energieform. Er beinhaltet den Nutzenergiebedarf sowie nutzerseitige Anlagenverluste (EnEV 2009).

4.2.4 Nutzenergiebedarf

Der Nutzenergiebedarf ist die tatsächlich für die Kühlaufgabe benötigte Energie. Er ist im Rahmen der Studie mit dem Kälteenergiebedarf gleich zusetzen.

4.2.5 Kühl- bzw. Kälteleistungsbedarf

Der Kühl bzw. Kälteleistungsbedarf entspricht der gesamten abzuführenden Wärmeleistung aus einem Prozess bzw. einem Gebäude.

4.2.6 Kühl- bzw. Kälteenergiebedarf

Der Kühl bzw. Kälteenergiebedarf entspricht der über einen Zeitraum aufsummierten, abzuführenden Wärmemenge aus einem Prozess bzw. Gebäude.

4.2.7 COP und EER

Der COP (*Coefficient of Performance*) ist die Leistungszahl eines Prozesses. Er ist definiert als das Verhältnis von Nutzleistung zu Antriebsleistung. Der Begriff EER *(Energy Efficiency Ratio*) ist von der Definition her (Verhältnis von Nutzleistung zu Antriebsleistung) identisch. Die Leistungskennzahlen COP und EER finden für Kompressionskälteanlagen Anwendung.

Hersteller von Wärmepumpen und Splitklimageräten sowie die DIN V 18599, verwenden die Begriffe je nach Anwendungsfall unterschiedlich, wobei der COP dem Anlagenbetrieb Heizen und der EER dem Anlagenbetrieb Kühlen zugewiesen wird. Verdichterhersteller beziehen die Leistungszahlangaben alleinig auf den Verdichter von Kompressionskälteanlagen und nicht auf die Kälteanlage insgesamt.

Die Angaben von COP und EER besitzen nur Aussagekraft in Verbindung mit der Angabe von Randbedingungen, insbesondere der Temperaturen von Wärmequelle und Wärmesenke.

4.2.8 Jahresarbeitszahl (SEER)

Die Jahresarbeitszahl (SEER - *Seasonal Energy Efficient Ratio*) gibt das Verhältnis der über das Jahr abgeführten Wärmemenge zur aufgenommenen elektrischen Energie an. Sie ist nicht mit der unter standardisierten Laborbedingungen ermittelten Leistungszahl zu verwechseln. Die Jahresarbeitszahl erfasst die jahreszeitlichen Schwankungen der Temperatur- sowie Lastbedingungen.

4.2.9 Wärmeverhältnis

Die thermische Effizienz von Sorptionskälteanlagen wird mit dem sogenannten Wärmeverhältnis berechnet. Das Wärmeverhältnis ist die aufgenommene Wärme (Nutzen) geteilt durch zugeführte Antriebswärme (Aufwand). Auch die Angabe des Wärmeverhältnisses ist nur in Verbindung mit der Angabe von den Temperaturbedingungen der Wärmezufuhr (kaltwasser- und heizwasserseitig) sowie der Wärmeabfuhr (kühlwasserseitig) aussagekräftig. Eine Ausnahme stellt das maximal erreichbare Wärmeverhältnis, abhängig vom Stoffpaar sowie der Anlagenbauart, dar.

4.2.10 Emissionsfaktoren der Strom- und Wärmeerzeugung

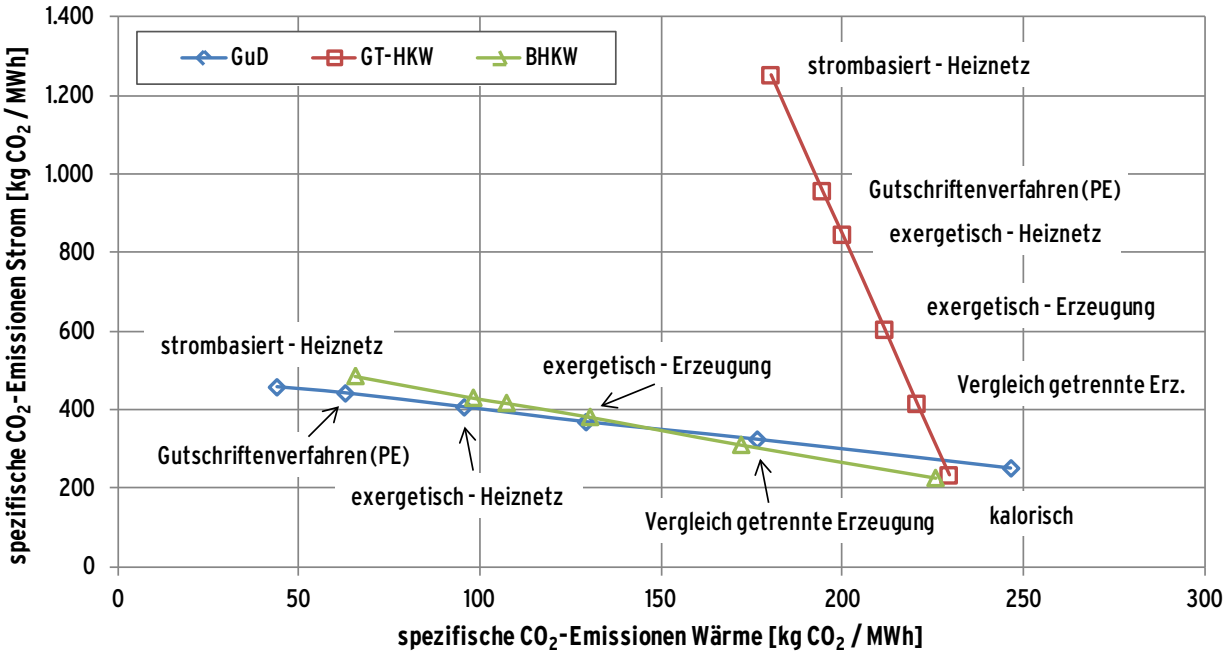
Der Emissionsfaktor für die Stromerzeugung in Deutschland beinhaltet die Vorkette zur Bereitstellung der Energieträger, den Umwandlungsverlust und die Verluste des Stromnetzes bis zum Verbraucher (GEMIS 2012).

Bei der Berechnung der spezifischen CO_2-Emission der Wärme aus KWK-Anlagen besteht das Problem der Zuordnung der durch den Brennstoff verursachten Emission auf die beiden Endprodukte Strom und Wärme der KWK. Nach VDI-Einheitsblatt 4660 und 4608-2 existieren

sechs unterschiedliche Verfahren zur Berechnung, auch als Allokations- bzw. Bewertungsmethoden bezeichnet (Energetische Methode, Arbeitswertmethode, Exergetische Methode, Exergieverlustmethode, Restwertmethode und Substitutionsmethode).

Darüber hinaus gibt es weitere, wie z.B. die Finnische Methode, auch als „Vergleich gegenüber getrennte Erzeugung" bezeichnet. Die Anwendung der verschiedenen Allokationsmethoden führt zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen. Einen guten Überblick über die Methoden und deren Ergebnisse liefert eine Präsentation des Instituts für Energietechnik der TU Dresden (Dittmann & Robbi 2008).

Abbildung 21: Spezifische CO2-Emissionen der Wärme aus KWK-Anlagen nach unterschiedlichen Allokationsmethoden (Dittmann & Robbi 2008)



Zwei Fälle sind für die vorliegende Studie von Bedeutung:

- BHKW als Nachrüstoption für Industrie- und Landwirtschaft zur eigenen Stromproduktion bei Nutzung der Abwärme z.B. zum Antrieb von Absorptionskälteanlagen
- Nah-/Fernwärme aus KWK-Anlagen

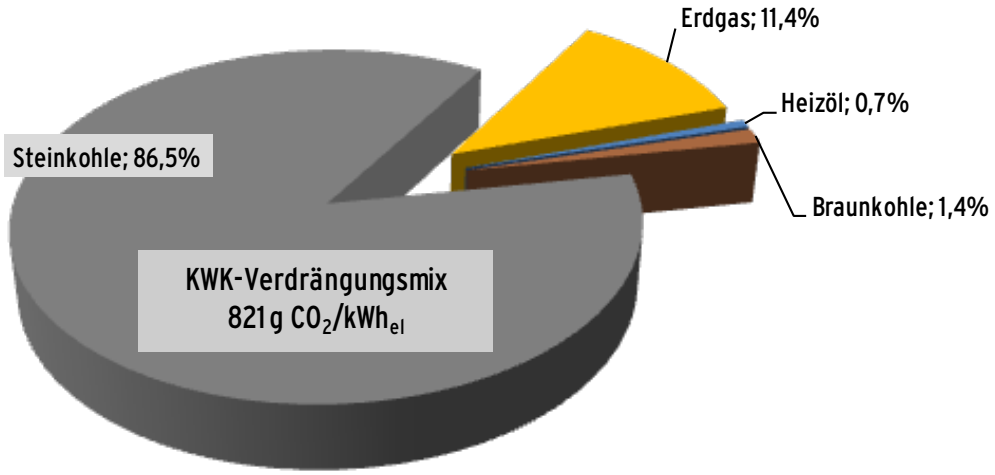
Wärmeerzeugung im BHKW

BHKWs stellen für Gewerbe und Industrie eine finanziell interessante Alternative zum Bezug von Strom über ein Energieversorgungsunternehmen dar. Die Einspeisung ins öffentliche Stromnetz ist im EEG (für Brennstoffe aus erneuerbaren Energiequellen und Deponiegas) bzw. im KWKG (bei fossilen Brennstoffen) geregelt (EEG 2009; KWKG 2009). Die Einspeisung wird insbesondere bei gleichzeitiger Abwärmenutzung durch den zusätzlichen KWK-Bonus (derzeit 5,11 ct/kWh für Anlagen < 50 kW) interessant.

Die Herkunft des durch KWK-Anlagen verdrängten Stroms wird durch verschiedene Aspekte beeinflusst: KWK-Anlagen und Erneuerbare Energien haben laut EEG und KWKG Vorrang vor anderen Stromproduzenten bei der Stromeinspeisung. Die weitere Verdrängung unterliegt dem Merit Order Effekt an der Strombörse (Pfeifroth & Beer 2009). Unter Nutzung einer

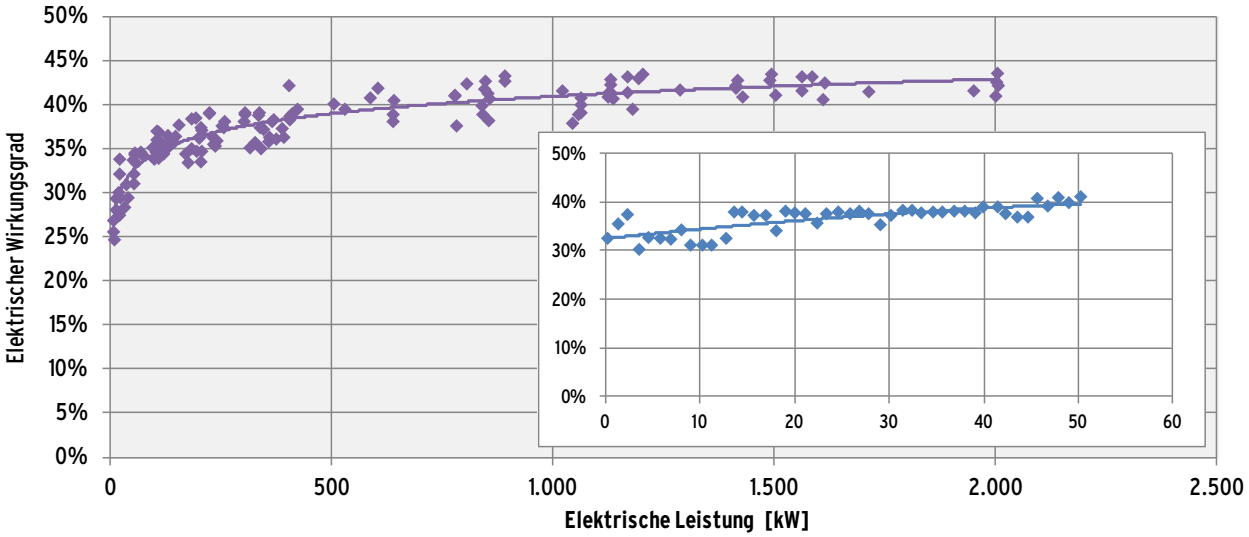
Simulation in 1h-Auflösung liefert die FfE-Studie (Pfeifroth & Beer 2009) für eine zusätzliche Einspeisung von 10 TWh KWK-Strom einen Verdrängungsmix entsprechend Abbildung 22. Für den Verdrängungsmix ergibt sich eine spezifische CO_2-Emission von 821 g CO_2/kW_{el}.

Abbildung 22: Verdrängungsstrommix bei KWK-Stromeinspeisung (Pfeifroth & Beer 2009)



Der elektrische Wirkungsgrad von BHKWs steigt mit zunehmender Leistungsgröße. Nach der ASUE-Studie (ASUE 2011) liegt der Durchschnitt bei Erdgas-BHKWs bei 38% bezogen auf den Brennstoffeinsatz. Der mittlere thermische Wirkungsgrad liegt bei 49%.

Abbildung 23: Elektrische Wirkungsgrade von Erdgas-BHKW (ASUE 2011)



Unter Bezug auf die spezifischen CO_2-Emissionen für Erdgas von 198,5 g/kWh (GEMIS 2012) und den mittleren elektrischen Wirkungsgrad von 38% ergeben sich bei Anrechnung der gesamten Emissionen auf den erzeugten Strom 522 g CO_2/kWh_{el}. Gegenüber dem Verdrängungsmix ergibt sich eine Einsparung von ca. 300 g CO_2/kWh_{el}. Auf die Abwärme entfallen keine weiteren CO_2-Emissionen. Theoretisch wäre auch eine Gutschrift der CO_2-Einsparungen auf die Wärme denkbar. Zur Vergleichbarkeit mit Wärme aus sonstigen Abwärmequellen erfolgt diese jedoch in der vorliegenden Studie nicht.

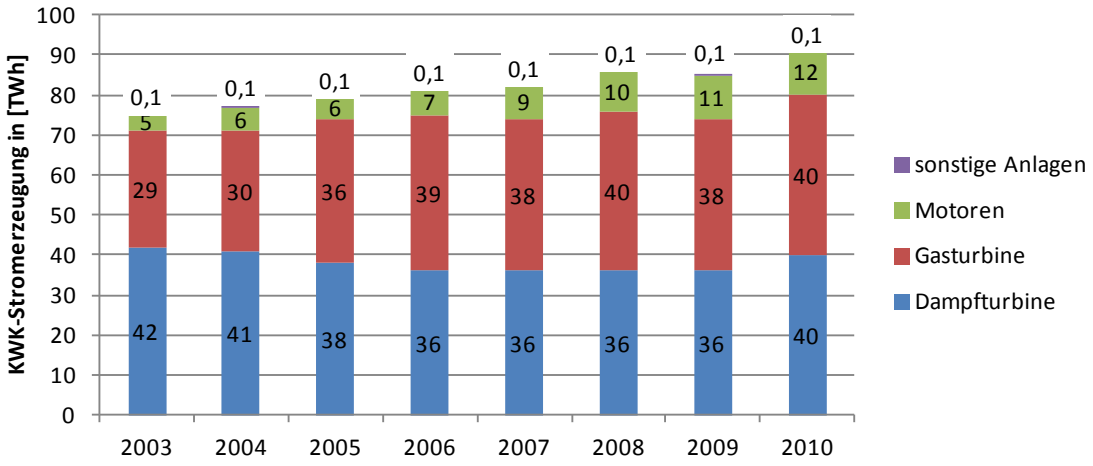
Fernwärme

Bei Entnahme der Wärme aus einem Fernwärmenetz ist der Einfluss der Wärmeauskopplung auf den Prozess bzw. die Effizienz der Stromerzeugung zu berücksichtigen. Die Bewertung der Arbeitsfähigkeit der ausgekoppelten Wärme (Stromverlust-Methode, Dresdner Methode) wird von Experten als physikalisch sinnvolle Berechnungsvariante empfohlen (Dittmann & Robbi 2008; Dittmann et al. 2009; Zschernig & Sander 2007).

Nach dieser Methode wird für einen realen Prozess berechnet, wie viel mehr an elektrischer Energie man hätte generieren können, wenn man anstatt bis zur Temperatur der Wärmeauskopplung bis zur Umgebungstemperatur entspannt hätte. Hierfür wird der Carnot-Kreisprozesswirkungsgrad ermittelt und mit dem Gütegrad einer realen Turbinenentspannung multipliziert. Diese Variante lässt sich auf bestehende Kraftwerke anwenden und benötigt keinen fiktiven Vergleichsprozess (Zschernig & Sander 2007).

Die Berechnung einer allgemein gültigen spezifischen CO_2-Emission für Fernwärme aus KWK in Deutschland ist mit diesem Verfahren jedoch schwer durchführbar. Sie müsste die eingesetzten Brennstoff der einzelnen Standorte sowie die tatsächlich ausgekoppelte Wärme berücksichtigen. Diese Schwierigkeit wird von den Autoren anhand einiger Beispiele verdeutlicht (Zschernig & Sander 2007). Auch die Studie des Öko-Instituts (Fritsche & Rausch 2008) liefert Emissionswerte nur für einzelne Kraftwerkstypen.

Abbildung 24: KWK-Stromerzeugung nach Anlagentypen (Quelle: Öko-Institut via (Umweltbundesamt 2012b))



Unterschiedliche Allokationsmethoden in Verbindung mit einer unzureichenden Datenbasis lassen ein breites Spektrum an Bewertungsmöglichkeiten entstehen. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, einen Ergebnisraum aufzuspannen, der die Schätzung realistischer Emissionswerte für den Bezug von Wärme zur Kälteerzeugung aufzeigt. Als untere und obere Grenze für die Bewertung innerhalb dieser Studie werden daher folgende Werte festgelegt:

- Fernwärme aus GuD-Kraftwerk, Bewertung nach Stromverlust-Methode → 44 g CO_2/kWh_{th} (Dittmann & Robbi 2008)
- Fernwärme aus Kohle-Heizkraftwerk, Bewertung nach Wirkungsgradmethode → 239 g CO_2/kWh_{th} (Fritsche & Rausch 2008)

Die in der Studie herangezogenen spezifischen CO_2-Emissionen der Antriebsenergien von Kälteanlagen sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Spezifische CO_2-Emissionen der betrachteten Antriebsformen von Kälteanlagen

Antriebsenergieform / Energieträger	spezifische CO_2-Emissionen [g/kWh]
Elektroenergie (Strommix Deutschland 2010, inkl. Vorkette, GEMIS 4.7)	583
Wärme aus Umweltenergie (Solarthermie, Geothermie)	0
Abwärme aus Erdgas-BHKW unter Berücksichtigung des Verdrängungsmixes	0
Fernwärme aus GuD-Kraftwerk, bewertet nach Stromverlust-Methode	44
Fernwärme aus Kohle-Heizkraftwerk, Bewertung nach Wirkungsgradmethode	239

Laut Umweltbundesamt wurden im Jahr 2009 in Deutschand 86 TWh_{el} aus KWK-Anlagen generiert. Bezieht man das Verhältnis zwischen Stromproduktion und Wärmeproduktion in KWK-Anlagen aus dem Jahr 2010 ein (46,2%), ergab sich eine Wärmeproduktion in KWK-Anlagen von 100 TWh_{th}. Bei einem Gesamtbrennstoffausnutzungsgrad von 85% (Fritzsche 2008, p.40), ergibt sich ein Brennstoffeinsatz in KWK-Anlagen von 219 TWh. Die CO_2-Emissionen aus KWK-Anlagen belaufen sich im gleichen Zeitraum auf 121,1 Mio t CO_2 (auf Basis der Einsparungen gegenüber Referenzsystem). Die mittleren spezifischen CO_2-Emissionen des Brennstoffeinsatzes ergeben sich zu 553 g $CO_2/kWh_{Brennstoff,KWK}$.

4.2.11 Treibhauspotenzial von Kältemitteln (GWP)

Das Treibhauspotenzial (Global Warming Potential, GWP) ist ein Vergleichsfaktor zur Bestimmung des Treibhauseffektes eines in die Atmosphäre emittierten Gases, ausgedrückt in CO_2-Äquivalenten. Es berücksichtigt den Einfluss der Wärmestrahlungsabsorption des betrachteten Gases und der Verweilzeit der Moleküle in der Atmosphäre. Das GWP von CO_2 beträgt 1. Die in Tabelle 5 dargestellten Zahlen entstammen den Tabellen 2.14 und 2.15 des *4th Assessment Report* des IPCC (Forster & Ramaswamy 2007). Sie gelten ab 2013 verbindlich für die Emissionsberichterstattung gemäß Kyoto-Protokoll. Abbildung 25 stellt GWP-Werte sowie die sicherheitstechnische Einteilung nach DIN EN 378 graphisch dar. Letztere beinhaltet die Einteilung nach Brennbarkeit und Giftigkeit. Eine Übersicht zu den Einteilungskriterien der DIN EN 378 liefert Tabelle 6.

Tabelle 5: GWP-Werte für relevante und in den Technologievergleichen verwendete Kältemittel

Kältemittel	Typ	Bezeichnung / Zusammensetzung	GWP-Wert
R32	HFKW	Diflourmethan	675
R134a	HFKW	1,1,1,2-Tetrafluorethan	1.430
R404a	HFKW Blend	Gemisch aus R125, R134a und R143a	3.922
R407C	HFKW Blend	Gemisch aus R32, R125 und 134a	1.774
R410A	HFKW Blend	Gemisch aus R32 und R125	2.088
R1234yf	HFO	2,3,3,3,Tetrafluorprop-1-en	4
R1234ze	HFO	trans-1,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-en	6
R290	KW	Propan	3,3
R600a	KW	Isobutan	4
R717	natürliches KM	Ammoniak	0
R718	natürliches KM	Wasser	0

R723	natürliches KM	Gemisch aus Dimetylether und Ammoniak	1
R744	natürliches KM	CO2	1
R1270	KW	Propen (Propylen)	1,8

Abbildung 25: Vergleich der GWP-Werte verschiedener Kältemittel sowie deren sicherheitstechnische Einstufung nach DIN EN 378

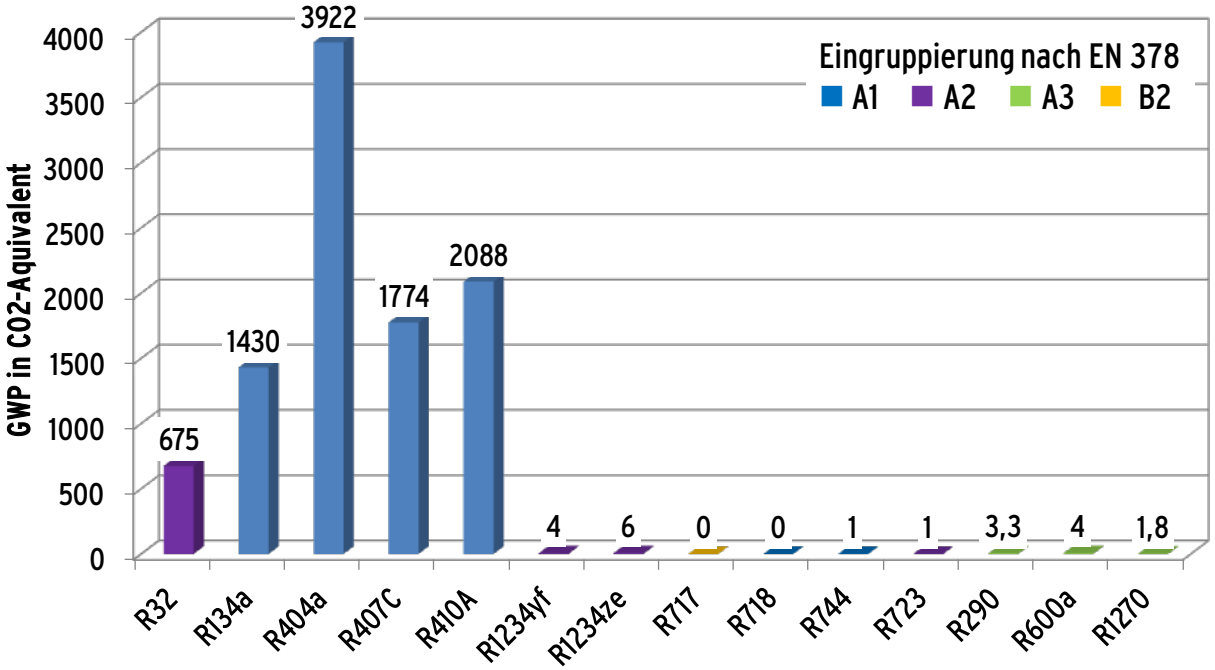


Tabelle 6: Sicherheitsgruppen nach Brennbarkeit und Giftigkeit nach DIN EN 378-1

zunehmende Brennbarkeit →	größere Brennbarkeit (UEG ≤ 3,5 Vol.-%; Verbrennungswärme ≥ 19.000 kJ/kg)	A3	B3
	geringe Brennbarkeit (UEG ≥ 3,5 Vol.-%; Verbrennungswärme < 19.000 kJ/kg)	A2	B2
	keine Flammenausbreitung	A1	B1
		geringere Giftigkeit (AGW ≥ 400 ppm)	größere Giftigkeit Toxizität (AGW < 400 ppm)
		zunehmende Toxizität →	

4.2.12 TEWI

TEWI (*Total Equivalent Warming Impact*) ist ein Verfahren zur Schätzung der Treibhausgasemissionen einer Anlage durch Erfassen sowohl der direkten Kältemittelemissionen (Leckagen, unsachgemäße Entsorgung) als auch der indirekten Emissionen (Kohlendioxid- und anderer Gasemissionen) verursacht durch die Umwandlung der für den Betrieb der Kälteanlage benötigten Energie. Hierbei werden sämtliche Emissionen über die gesamte Lebensdauer der Anlage in CO_2-Äquivalenten ermittelt (DIN-EN-378-1 2011). Eine genaue Definition dieser Bewertungsgröße befindet sich in Kapitel 7.2.2 auf S. 110.

5 Energieverbrauch durch Klimatisierung von Nichtwohngebäuden und Prozesskältebedarf in Industrie und produzierendem Gewerbe

5.1 Vorbetrachtungen

Verglichen mit den erhobenen Daten für Elektroenergieerzeugung, Elektroenergieverbrauch und Brennstoffverbrauch für Elektroenergieerzeug, Gebäudeheizung und Verkehr liegt für den Kältebedarf und dem damit verbundenen Endenergiebedarf in Deutschland nur sehr lückenhaftes Datenmaterial vor. Die Auswirkungen der Kälte- und Klimatechnik auf die energiebedingten CO_2-Emissionen sind schwer quantifizierbar.

Eine statistische Erfassung des Energieverbrauchs für Kühlaufgaben wäre für die Gesamtbeurteilung von Kältesystemen in den verschiedenen Anwendungen sehr hilfreich. Auch dem Anwender selbst stünden hierdurch wichtige Informationen zur Verfügung, die entscheidend für die Wahl eines Kältesystems sind. Erst wenn Energiebedarf, Emissionen und Kosten der Kältebereitstellung sowie die Möglichkeiten zur Beeinflussung von Kosten und Emissionen durch die Anlagengestaltung bekannt sind, kann mit einem wachsenden Verständnis für die Problematik gerechnet werden.

Aufgrund der lückenhaften Datenbasis des Energieverbrauchs der Kältetechnik wird zunächst ein Abgleich der Daten aus unterschiedlichen Quellen vorgenommen. Die Daten werden durch theoretische Berechnung und Vergleiche auf ihre Plausibilität und Stichhaltigkeit hin geprüft.

5.2 Methodik

Der Inhalt des Kapitels 5 ist Ausgangsbasis für eine quantitative Bewertung des Ist-Standes sowie für die Beurteilung von Maßnahmen und deren Wirkung auf den Elektroenergie- und den Primärenergieverbrauch sowie auf die durch Kälteerzeugung verursachten CO_2-Emissionen in Deutschland.

Als Grundlage für die Szenarien wird ein Datenbanksystem hinsichtlich der einzelnen Branchen und Industriezweige entwickelt. Um die Möglichkeiten der Substitution von elektrisch angetriebenen Kälteanlagen durch wärmegetriebene Kältesysteme zu beurteilen, sind neben der Erfassung des Energiebedarfs zur Kälteerzeugung auch die Kältetemperatur, die zeitliche Charakteristik des Kältebedarfs sowie Daten zur Verfügbarkeit von Wärmequellen zu ermitteln. Für eine ausreichende und umfassende Datenbasis wird weit über die Studie zum Energiebedarf für Kältetechnik in Deutschland (Guntram Preuß 2011) hinaus recherchiert. Für einige Informationen werden zusätzliche Annahmen getroffen. Diese werden in den folgenden Abschnitten dokumentiert, in welchen der Energiebedarf für die Kälteerzeugung (Klimatisierung und Prozesskälte) in den einzelnen Branchen hergeleitet wird.

Die Ermittlung erreichbarer Klimaschutzeffekte schließt den Einsatz natürlicher Kältemittel in Kompressionskälteanlagen, wärmegetriebener Kältesysteme und thermischer Speichersysteme ein.

In der Datenbank wird neben dem Kältebedarf auch die Bedarfscharakteristik (mittlere benötigte Kältetemperatur, saisonale und tägliche Schwankungen) erfasst. Zur Bewertung der Effekte eines Ersatzes von Kompressionskälte durch wärmegetriebene Kältesysteme werden

Abwärmequellen und deren Charakteristiken ebenfalls ermittelt. Neben den bereits genutzten Abwärmequellen für die Kälteerzeugung liefert der sonstige Bedarf an Wärme und Brennstoffen einen guten Überblick über potenzielle Wärmequellen und das zusätzliche Potenzial für KWK-Anlagen.

Abbildung 26 zeigt die Struktur der nach Branchen geordneten Einträge, wie sie in der für weiterführende Analysen erstellten Datenbank verwendet wird. Die Struktur ist an diejenige der VDMA-Studie zum Energiebedarf für Kältetechnik in Deutschland (Guntram Preuß 2011) angelehnt. Zur Schätzung des Kältebedarfs im Bereich Nahrungsmittelherstellung wurde in der VDMA-Studie das Schema aufgrund der mangelnden Datenlage vereinfacht. Die Zuordnung richtet sich hier nicht nach den einzelnen Branchen sondern nach Betriebsgröße, unterteilt in Normal- und Tiefkühlung. Für die Schätzung des (Ab)Wärmepotenzials in den einzelnen Branchen ist die in Abbildung 27 dargestellte Struktur notwendig. Eine Überführung der Daten der Studie (Guntram Preuß 2011) in das dargestellte Schema ist jedoch nur mit vereinfachenden Annahmen möglich.

Abbildung 26: Gruppierung des Kälte- und Energiebedarfs – Nahrungsmittelindustrie nach VDMA Studie (Guntram Preuß 2011)

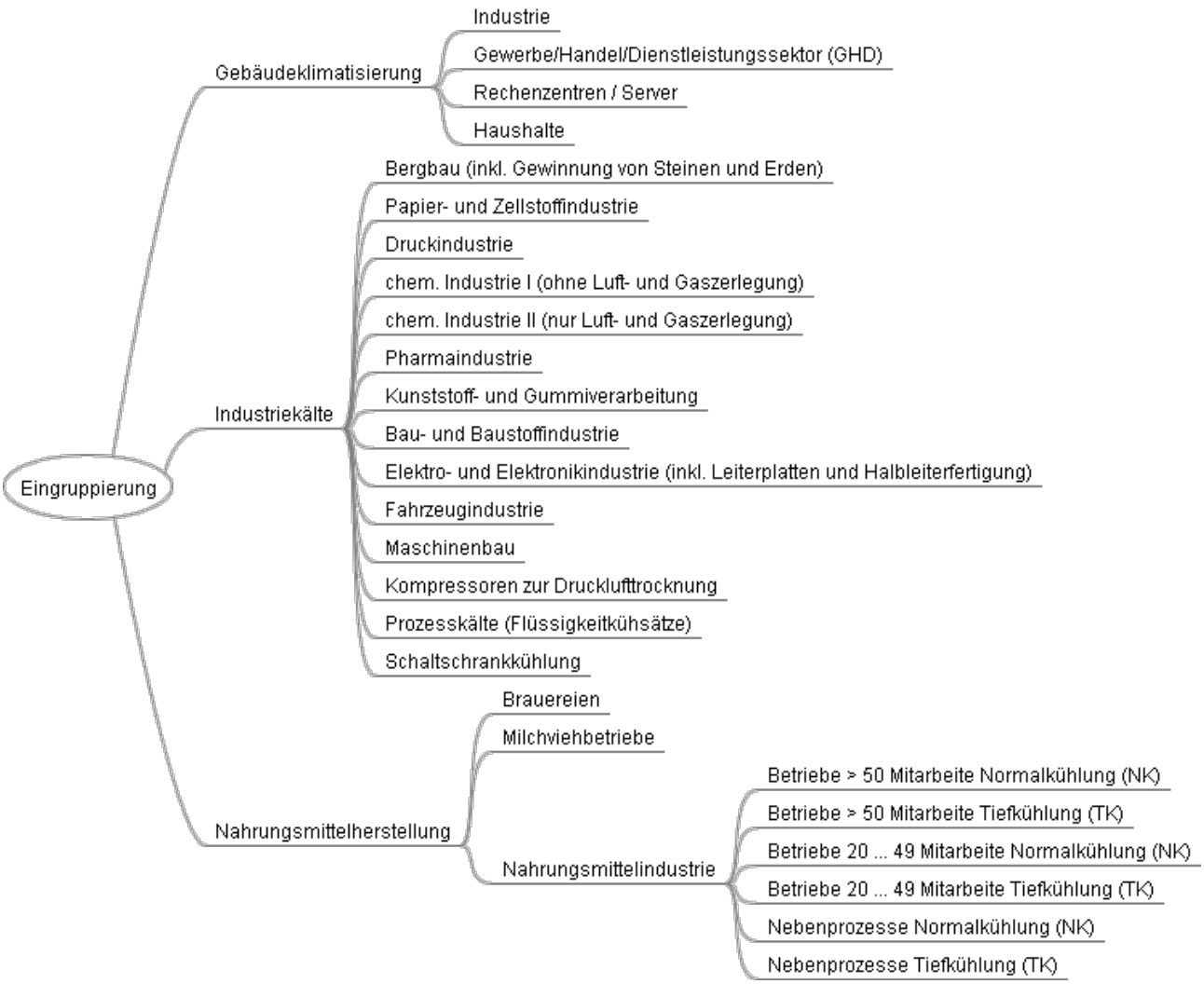


Abbildung 27: Untergruppierung der Nahrungsmittelindustrie entsprechend Industriezweigen

5.3 Datenquellen

Daten zum Kältebedarf in den Bereichen Industrie- und Gebäudeklimatisierung stehen nur beschränkt zur Verfügung. Gegenüber dem Elektroenergie-, Gas- und Ölverbrauch wird die Kälteenergie in der Regel nicht gemessen. Auch die für den Antrieb der Kältemaschinen notwendige Antriebsenergie wird nur selten separat erfasst. Das hat zur Folge, dass quantitative Aussagen auf Basis von Annahmen und Berechnungsmodellen getroffen werden müssen.

Die nicht vorhandene Erfassung der kältetechnischen Verbrauchsdaten führt zu einem weiteren nachteiligen Effekt hinsichtlich der Nachhaltigkeit: Anlagenbetreiber werden durch die Unkenntnis des Verbrauchs nicht für Energieeinsparpotenziale der Kältetechnik sensibilisiert.

Im Folgenden wird auf die wesentlichen Quellen der Energiebedarfserfassung eingegangen. Daneben findet sich eine Vielzahl von branchenspezifischen Literaturquellen, auf die an gegebener Stelle eingegangen wird.

5.3.1 Preuß: Energiebedarf für Kältetechnik in Deutschland - 2011

Eine wichtige Quelle ist die bereits erwähnte Studie des VDMA „Energiebedarf für Kältetechnik in Deutschland“. Zum Zeitraum der Bearbeitung stand die veröffentlichte Version noch nicht zur Verfügung. Als Basis dienten Entwurfsversionen vom Februar und März 2011.

Die Studie baut auf einer vom gleichen Autor verfassten Studie zur Verwendung der Kältetechnik in Deutschland (Gruntram Preuß 2010) auf und knüpft unter anderem an die Studie des DKV zur Situation 2002 (DKV 2002) an.

Die Datengrundlage der VDMA-Studie sind Berechnungen und Auswertungen einer Vielzahl von Statistiken sowie Informationen von Unternehmen der Kältetechnik und von Anwendern. Aufgrund der begrenzten statistischen Datengrundlage wurden Schätzungen und Plausibilitätsannahmen vorgenommen. Der Autor selbst nennt die Ergebnisse eine weiter zu verfeinernde Diskussionsgrundlage. Die Studie bezieht sich in vielen Fällen auf den Endenergiebedarf in Form von Elektroenergie. Der Kältebedarf selbst wird selten quantifiziert. Die Einbeziehung von Sorptionskältesystemen erscheint im Vergleich zu anderen Studien unvollständig.

Von den in (Guntram Preuß 2011) behandelten 11 Bereichen der Kältetechnik sind für die vorliegende Studie die Bereiche 3. „Nahrungsmittelherstellung“, 6. „Klimakälte“ sowie 7.

„Industriekälte“ von Bedeutung. Die Strukturierung der Bereiche in dieser Arbeit erfolgt angelehnt an die Studie des VDMA.

5.3.2 DKV Statusbericht 22 – Energiebedarf für die technische Erzeugung von Kälte - 2002

Die DKV-Studie von 2002 (DKV 2002) ist der Vorläufer der VDMA-Studie. Die Erarbeitung erfolgte durch verschiedene Institutionen mit unterschiedlichen Methoden und Herangehensweisen. Gegenüber der VDMA-Studie bietet sie jedoch in vielen Fällen weitergehende Informationen zu benötigten Temperaturniveaus, zu Leistungszahlen sowie zum Kälteenergiebedarf selbst. In Ermangelung aktuellerer Daten werden auch Zahlen aus dieser Studie für die vorliegende Untersuchung herangezogen.

5.3.3 Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen - 2008

Die von Prognos, TU München und Fraunhofer ISI gemeinsam erarbeitete Studie (Seefeldt et al. 2010) bietet detaillierte Informationen zum Elektroenergiebedarf der Kältetechnik nach Branchen und Kälteanwendung. Diese werden ergänzend zur VDMA-Studie und zur Aufschlüsselung des Kältebedarfs der Klimatisierung bzw. der Prozesskälte genutzt. Diese Quelle ist darüber hinaus Basis für die Erfassung des Strom- und Wärmegesamtbedarfs. Sie liefert zudem Informationen zu eingesetzten Energiequellen für die Wärmeerzeugung.

5.3.4 AG Energiebilanzen e.V. - 2011

Die Statistiken der AG Energiebilanzen e.V. (AG-Energiebilanzen-e.V. 2011) bieten einen detaillierten Überblick über die Verwendung einzelner Energieträger in den jeweiligen Industriebranchen. Weiterhin werden Angaben zu Strom- und Wärmebedarf sowie zu deren Bezugsquellen gemacht. Diesen Angaben können im Hinblick auf die Potenziale wärmegetriebener Kältesysteme wichtige Informationen entnommen werden. Die Quelle ist neben (Seefeldt et al. 2010) zur Erarbeitung der Datenbasis von Strom- und Wärmegesamtbedarf sowie der Energieträger zur Wärmeerzeugung nützlich.

5.3.5 ASUE - Absorptionskälteanlagen - Grundlagen und Referenzen - 1995

In den bisher aufgeführten Studien liegen wenige Informationen zu wärmegetriebenen Kältesystemen vor. Der Anteil am Gesamtkältebedarf wird anhand einer Veröffentlichung der Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. zu installierten Absorptionskältemaschinen (ASUE 1995) auf Plausibilität geprüft. Diese ist mit Stand 1995 nicht mehr aktuell, ein Nachfolger wurde nicht veröffentlicht, dennoch belegt die Übersicht sehr gut Einsatzfälle von Absorptionskälteanlagen.

Durch die hohe Lebensdauer von Absorptionskälteanlagen (bis zu 50 Jahre aufgrund weniger Komponenten mit bewegten Teilen) ist zu erwarten, dass zahlreiche Anlagen noch in Betrieb sind. Andererseits belegt eine aktuelle Veröffentlichung in der Fachzeitschrift Die Kälte (Simmert 2011) eine Installationsrate neuer Absorptionskälteanlagen (45 MW im Jahr 2010), die den jährlichen Durchschnitt der Jahre 1970 bis 1996 um einen Faktor 4 übertrifft. Gegenüber dem jährlichen Durchschnitts der Jahre 1990 bis 1994 markiert ist die angegebene Installationsrate immer noch doppelt so hoch. Hieraus ist zu folgern, dass die zusätzlich in die Studie eingeflossenen Angaben zu Absorptionskälte eher einen Minimalwert darstellen.

5.4 Industriekälte

5.4.1 Bergbau, Gewinnung von Steinen und Erden (nur Steinkohleabbau)

Der DKV-Statusbericht 22 (DKV 2002) analysiert den Bereich Bergbau sehr genau mit dem Ergebnis, dass in Deutschland Bedarf für Kältetechnik hauptsächlich im Steinkohlebergbau zur Bewetterung und in Salzbergwerken besteht. In letzteren erfolgte der Abbau überwiegend mit mobilen Maschinen, die mit Führerständen ausgerüstet sind. Die VDMA-Studie ordnet diese dem Bereich Fahrzeugklimatisierung zu (Guntram Preuß 2011). Preuß nimmt die Zahlen aus (DKV 2002) zur Basis und korrigiert sie anhand der Abnahme der Steinkohleförderung auf ein Drittel im Vergleich zum Stand 1999. Der Endenergiebedarf wird mit 160 GWh/a beziffert (Guntram Preuß 2011) .

Zur Ermittlung des Kälteenergiebedarfs wurden Jahresarbeitszahlen nach (DKV 2002) herangezogen. Der Kälteenergiebedarf kann so auf 560 GWh/a geschätzt werden. Die notwendige Temperatur des Kälteträgers liegt bei 3 °C (DKV 2002).

Für die Verwendung von wärmegetriebenen Systemen kommen zwei Wege in Frage. Zum einen entsteht in einigen Bergwerken Grubengas, welches in einer KWK-Anlage zur Stromerzeugung genutzt werden kann. Die auszukoppelnde Wärme (ganzjährig verfügbar) kann zur Kälteerzeugung eingesetzt werden. Derartige Anlagen sind in Bergwerken im In- und Ausland (NRW, Polen, Russland, China) realisiert (Evonik_Industries 2010; IGV 2012). An deutschen Standorten fallen jährlich ca. 250 Mio. m^3 Grubengas (Normzustand) an (Stand 2010), davon mehr als 85% in nicht mehr aktiven Bergwerken (IGV 2012). Aktuell wird das Grubengas in Deutschland in 125 BHKWs mit einer installierten Gesamtleistung von 158 MW_{el} genutzt. Nimmt man ein Verhältnis von 1,35:1 für das Verhältnis Wärmeleistung zu elektrische Leistung an (vgl. Abbildung 110 in Abschnitt 8.2, Seite 166) ergibt sich eine Wärmeleistung von ca. 215 MW_{th}. Bei einer Auslastung von 98% über das Jahr ergibt sich eine Wärmemenge von 1.790 $GWh_{th.}$ Bezieht man nur die aktiven Bergwerke ein, ergibt sich eine Wärmemenge von 260 $GWh_{th.}$ Für die aktiven Standorte weist (IGV 2012) eine Nutzung der Wärme durch die Stadtwerke aus (Einkopplung ins Fernwärmenetz). Es ist anzunehmen, dass zumindest in den Sommermonaten ein Wärmeüberschuss vorhanden ist.

Alternativ kann an Standorten, an denen gleichzeitig Kohle zur Verstromung verbrannt oder zu Produkten wie Koks und Rohgas weiter verarbeitet wird, Wärme ausgekoppelt werden. Ein Beispiel wäre der Standort Ibbenbüren, an welchem gleichzeitig ein Kohlekraftwerk mit einer installierten elektrischen Leistung von 709 MW_{el} steht, welches jedoch nicht für die Wärmeauskopplung vorgesehen wurde. Aufgrund weiterer geplanter Bergwerksschließungen spielt dieser Bereich in Zukunft eine immer geringere Rolle.

5.4.2 Papier- und Zellstoffindustrie

Die Papierindustrie besitzt einen relativ geringen Bedarf an Kältetechnik im Produktionsprozess. Eine größere Rolle spielt die Klimatisierung der Produktionsstätten, welche dem Bereich Klimatisierung zugeordnet werden (Guntram Preuß 2011). Der Strombedarf für Prozesskälte wird mit 90 GWh/a beziffert (Seefeldt et al. 2010). Der Kälteenergiebedarf von 252 GWh/a wurde anhand einer in einem Beispielbetrieb ermittelten Jahresarbeitszahl von ca. 2,8 (LfU-Bayern 2003) berechnet.

Die Referenzliste der ASUE weist im Papierindustriebereich Absorptionskälteanlagen mit 5,5 MW installierter Kälteleistung aus (ASUE 1995). Auch bei hoher Auslastung ist der damit erbrachte Kälteenergiebetrag zu vernachlässigen.

5.4.3 Druckindustrie

In der Druckindustrie kommt die Kältetechnik zur Kühlung von Druckmaschinen sowie zur Abkühlung von Druckerzeugnissen nach Infrarot- und UV-Trocknungsprozessen zum Einsatz (Guntram Preuß 2011; Quint-sdi-GmbH 2010). Weiterhin besteht in den Produktionsbereichen oft Klimatisierungsbedarf, insbesondere wenn die Abwärme der Maschinen nicht über eine direkte Kühlung nach außen abgeführt wird.

Die benötigten Kühlwassertemperaturen für die Druckmaschinen liegen mit 20 bis 28 °C (Mictom Ltd / Co. KG 2010; Tebert & Schmid-Bauer 2006) auf einem hohen Niveau und bedürfen nur in wenigen Sommermonaten des Einsatzes einer Kältemaschine. Dennoch wird in vielen Betrieben das Kaltwassernetz mit deutlich tieferen Temperaturen betrieben (z.B. 6°C Vorlauftemperatur (Henrichs 2009)).

Die notwendige elektrische Antriebsenergie von Kälteanlagen in der Druckindustrie wird von (Guntram Preuß 2011) ausgehend vom spezifischen Stromverbrauch (150 kWh/t_{Papier}, 5 % davon, also 7,5 kWh/t_{Papier} entfallen auf die Kältetechnik (Gloor 2010)) und der Jahrespapierproduktion (22 Mio. t mit der Annahme, dass davon ein Drittel bedruckt wird (Guntram Preuß 2011)) auf 55 GWh/a geschätzt.

Eine Schätzung des Kältebedarfs, welcher durch Kältemaschinen zu decken ist, ist aufgrund der hohen Temperaturen der Abwärme nur bedingt möglich. Als Beispiel sei hier die Abkühlung der Papierrollen nach dem Trocknungsprozess von ca. 130 °C auf 35 °C genannt. (Cornehl 1998) liefert in ihrer Dissertation Zahlen für die Firma Mohndruck in Gütersloh, welche über ein eigenes Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerk (GuD) mit 3 Gasturbinen und nachgeschalteter Absorptionskältemaschine verfügt. Die installierte Kälteleistung der Anlage beträgt 19 MW bei einer elektrischen Leistung von 19 MW. Die Jahreskälteenergieproduktion wird mit 35 GWh/a angegeben. Die erzeugte Kälte wird als Prozesskälte sowie zur Klimatisierung von Lagerhallen und zugehörigen Bürogebäuden verwendet. Die Produktionsmenge von Mohndruck beträgt 380.000 t bedrucktes Papier (Henrichs 2009). Das sind ca. 5% der geschätzten deutschen Jahresproduktion von 7,3 Mio. t (Guntram Preuß 2011). Rechnet man diesen Kältebedarf auf die gesamte deutsche Jahresproduktion hoch, ergibt sich ein Kälteenergiebedarf von 700 GWh/a. Vergleicht man den elektrischen Endenergiebedarf von 55 GWh/a mit dem geschätzten Kälteenergiebedarf von 700 GWh/a ergibt sich unter der Annahme, dass nur Kompressionskältemaschinen eingesetzt werden, eine Jahresarbeitszahl von 12,7. Dieser sehr hohe Wert ist bei den hohen Vorlauftemperaturen, wie in (Ltd / Co. KG 2010; Tebert & Schmid-Bauer 2006) beschrieben, durchaus realistisch.

Ausgehend von 2.000 Mitarbeitern der Fa. Mohn Media am Standort Gütersloh (Hommel 2006) sowie einem typischen jährlichen pro Kopf-Kältebedarf zur Klimatisierung von 640 kWh Kälte/Person (Probst 2008) kann man den anteiligen Klimatisierungsbedarf schätzen. Arbeiten 2/3 der Personen im Büro, ergibt sich ein Klima-Kältebedarf von 0,85 GWh/a. Der Anteil am Gesamtkältebedarf ist mit knapp 3 % sehr klein.

Die Anwendung der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (mit BHKWs oder Gasturbinen-Kraftwerke) in der Druckindustrie findet bei verschiedenen Autoren Erwähnung (Fischedick et al. 2002;

Henrichs 2009), jedoch konnten außer dem Beispiel der Mohndruck Media GmbH (Henrichs 2009) keine weiteren konkreten Beispiele gefunden werden.

5.4.4 Chemieindustrie (ohne Luft- und Gasverflüssigung)

Detaillierte Daten zum Einsatz der Kältetechnik in der chemischen Industrie liegen nicht vor, die Kältestudie des VDMA (Guntram Preuß 2011) stützt sich auf den Strombedarf für Prozesskälte in der Grundstoffchemie und der sonstigen chemischen Industrie, entsprechend des Endberichts von ISI, TUM und Prognos (Seefeldt et al. 2010). Diese geben einen Stromverbrauch für Kältetechnik von 1.950 GWh/a für 2007 an. Der Statusbericht Nr. 22 des DKV (DKV 2002) geht von einem Endenergiebedarf von 404 GWh/a für das Referenzjahr 1999 aus. Die deutlichen Unterschiede sind nicht mit einer gestiegenen Produktion zu erklären. Für den vorliegenden Bericht werden die Daten entsprechend ISI, TUM und Prognos verwendet.

Die Kälteerzeugung wird überwiegend mit sehr großen Einzelanlagen mit installierten Kältekapazitäten größer 1 MW bewerkstelligt (DKV 2002). Die gewichtete mittlere Temperatur der Kälteerzeugung wird mit -4,2 °C angegeben. Der Kältebedarf für das Referenzjahr 1999 beläuft sich auf 1.085 GWh/a (DKV 2002). Unter der Annahme einer rein auf Kompressionskälte basierenden Versorgung ergibt sich für das Referenzjahr somit ein COP von 2,7. Wendet man diesen COP auf den Stromverbrauch für 2007 an (Seefeldt et al. 2010), ergibt sich ein Kältebedarf von 5.270 GWh/a.

Die VDMA-Studie geht für diesen Bereich nicht weiter auf Absorptionskälteanlagen ein. Zieht man die Daten der ASUE aus dem Jahr 1995 heran (ASUE 1995) ergibt sich eine installierte Kälteleistung im Chemie- und Pharmaziesektor von ca. 100 MW, was ca. der Hälfte der gesamten installierten Absorptionskälteleistung in Deutschland für das Jahr 1995 entspricht. Hierbei sind nur die Anlagen mit Inbetriebnahme nach 1970 gezählt. Auf die Kälteleistung bezogen sind 97% dieser Anlagen indirekt beheizte Systeme (Abwärme, Fernwärme, Dampf). Die jährlich installierte Leistung lag bei 4 MW/a (8,3 MW/a für alle Bereiche). Vergleicht man die Zahlen der jährlichen Installationen mit aktuellen Zahlen (für das Jahr 2010 gibt (Simmert 2011) eine neu installierte Leistung von 45 MW an), so muss der aktuelle Bestand für die Chemieindustrie ebenfalls nach oben korrigiert werden. Für die Berechnungen des Energiebedarfs wird eine installierte Absorberleistung von 200 MW angenommen.

Die Schätzung der Vollbenutzungsstunden der AKM ist schwierig, da Betreiber Kompressions- und Absorptionskälteanlagen oft parallel installiert haben und diese entsprechend der aktuellen Strom- und Wärmekosten betreiben. Für eine Schätzung wird eine Vollbenutzungsstundenzahl von 4.000 h/a angenommen. Hieraus folgt weiterer Kältebedarf von 800 GWh/a. Mit einem Wärmeverhältnis von 0,7 ergibt sich ein zugehöriger Wärmebedarf von 1.140 GWh/a.

5.4.5 Chemieindustrie – Luft- und Gasverflüssigung

Die Luft- und Gasverflüssigung nimmt aufgrund des speziellen Kälteverfahrens und ihres hohen Energiebedarfs in der chemischen Industrie eine Sonderrolle ein. Das Gas wird bei den gebräuchlichen Verfahren nach Linde bzw. den Verfahren mit zusätzlicher Entspannungsmaschine (z.B. Claude-Heylandt-Verfahren) selbst als Arbeitsstoff verwendet (Jungnickel et al. 1985). Hieraus folgt, dass der vorhandene Kältebedarf nicht durch andere Kältemaschinen ersetzt werden kann.

In Deutschland wurden in den letzten 10 Jahren jährlich zwischen 5.000 und 7.700 Mio. m^3 Sauerstoff produziert, wobei Werte um 5.000 Mio. m^3 nur in den Jahren 1999 und 2009 zu beobachten waren (VCI 2011). Für die weitere Bearbeitung wird von einem Mittelwert von 7.000 Mio. m^3 ausgegangen (vgl. 2008: 7.210 Mio m^3, 2010: 6.934 Mio m^3). Im Jahr 2007 wurden für eine Produktionsmenge von 7.697 Mio. m^3 Sauerstoff 5.400 GWh/a Strom benötigt (Seefeldt et al. 2010). Dies entspricht einem spezifischen Strombedarf von 0, 70 kWh/m^3.

Der DKV-Statusbericht Nr. 22 (DKV 2002) gibt die nach Gasart unterschiedenen Anteile der erzeugten Kälte sowie der zugehörigen Antriebsenergie an. Die Sauerstoffgewinnung besitzt einen Anteil von ca. 65% bezogen auf die gesamte produzierte Gasmenge. Sie weist im Bezug auf die erzeugte Kälte einen Anteil von ca. 68% auf. Für das im Statusbericht Nr. 22 verwendeten Referenzjahr 1999 gibt der VCI eine Sauerstoffproduktion von 5.634 Mio. m^3 an (VCI 2011).

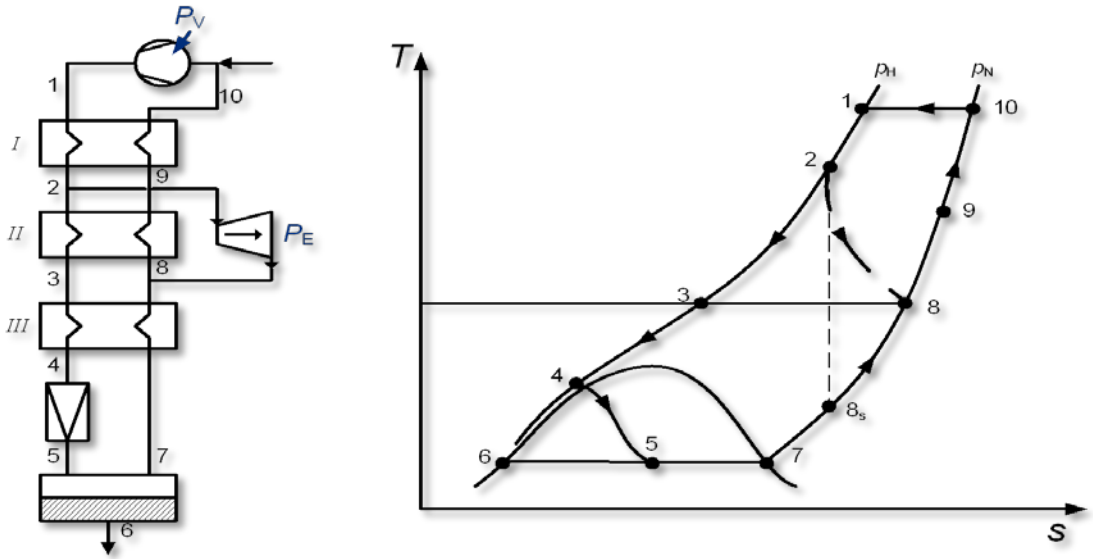
Im Jahr 1999 betrug die aufgewandte Antriebsenergie für die Gasverflüssigung 5.006 GWh/a, die erzeugte Kälte 900 GWh/a (DKV 2002). Entsprechend der benannten Anteilen entfallen somit ca. 3.253 GWh/a auf die Sauerstoffverflüssigung. Für eine durchschnittliche Sauerstoffproduktion von 7.000 Mio. m^3/a und einem spezifischen Strombedarf von 0,7 kWh/m^3 ergeben sich ca. 4.900 GWh/a. Bezieht man den Anteil der Sauerstoffproduktion nach DKV Statusbericht 22 ein, ergibt sich ein Gesamtstrombedarf von ca. 7.540 GWh/a.

In der Kältestudie des VDMA (Guntram Preuß 2011) wird für das Jahr 2009, welches eine unterdurchschnittliche Sauerstoffproduktionsmenge aufwies, von einem Endenergiebedarf für die Luftverflüssigung von 5.200 GWh/a Strom ausgegangen. Für Jahre mit durchschnittlicher Produktionsrate kann die ermittelte Strommenge von 7.540 GWh/a als realistisch angenommen werden. Die erzeugte Kälte ergibt sich nach analogem Berechnungsweg zu 1.120 GWh/a.

Ein Ersatz der Kälteproduktion für die Luftzerlegung durch wärmegetriebene Verfahren ist, wie oben beschrieben, nicht möglich. Betrachtet man jedoch das Claude-Verfahren im Aufbau sowie den Prozess im T-s-Diagramm (siehe Abbildung 28) wird die isotherme Verdichtung zwischen Punkt 10 und 1 deutlich.

Die isotherme Verdichtung wird in ausgeführten Anlagen durch mehrstufige Verdichtung mit Zwischenkühlung angenähert. Es werden bis zu 30 Verdichterstufen hintereinander geschaltet. Eine Zwischenkühlung erfolgt jedoch aufgrund des hohen Druckverlustes durch die Wärmetauscher nicht nach jeder Stufe (Effizienzgewinn geht durch den Druckverlust verloren). In Folge werden in industriellen Anlagen Gasaustrittstemperaturen im Bereich von 500 °C erreicht. Die hier vorhandene Abwärme wird über einen Dampfprozess in mechanische Energie umgewandelt.

Abbildung 28: RI-Schaltbild (links) und Prozess im T-s-Diagramm (rechts) der Luftzerlegung mit Entspannungsmaschine (Jungnickel; Agsten; Kraus 1985)



Eine weitere Unterkühlung durch den Einsatz von wärmegetriebenen Kältemaschinen ist unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu überprüfen. Umsetzungsmöglichkeiten werden z.B. in veröffentlichten Patenten vorgeschlagen (Riesch 1999).

5.4.6 Pharmazeutische Industrie

Für die Pharmaindustrie liegen keine statistischen Erhebungen bezüglich des Kältebedarfs und des damit verbundenen Endenergiebedarfs vor. Im DKV-Statusbericht 22 (DKV 2002) sind zur Pharmazeutischen Industrie keine Daten aufgelistet. Die VDMA-Studie (Guntram Preuß 2011) schätzt für 304 Betriebe mit mehr als 20 Beschäftigten einen Endenergiebedarf zur Kälteerzeugung von 328 GWh/a.

Die Verwendung von Absorptionskälteanlagen wird in der Studie erwähnt; Angaben zum Anteil am Gesamtkältebedarf finden sich jedoch nicht. Für die vorliegende Studie wird daher mit einem Anteil der Absorptionskälte von 35 % bezogen auf den Endenergiebedarf gerechnet, wie er auch in der chemischen Industrie zu beobachten ist. Für die Berechnung des Kältebedarfs wird für die Kompressionskälteanlagen eine Jahresarbeitszahl von 4,0 (große Anlagen, Kältebedarf über gesamtes Jahr) bzw. für die Absorptionskälteanlagen ein Wärmeverhältnis von 0,7 angenommen.

5.4.7 Kunststoff- und Gummiindustrie

In der Kunststoff- und Gummiindustrie besteht ein großer Kühl- und Kältebedarf für die Abkühlung von Bauteilen nach dem Extrudier- und dem Spritzgussprozess. Die Temperaturen liegen je nach Produkt und Maschine zwischen 200 und 270 °C (LfU-Bayern 2002). Die Geschwindigkeit der Abkühlung wird hierbei entscheidend von der Vorlauftemperatur des Kühlkreislaufes geprägt. Zu Erhöhung der Auslastung der Maschinen werden selbst für Abkühlung von z.B. 200 auf 80 °C Kühlkreisläufe mit 6°C im Vorlauf gefahren. Weiterhin besteht ein Kältebedarf für die Bereitstellung sehr trockener Luft im Bereich der Kunststoffproduktion.

Der gesamte Strombedarf in der Kunststoff- und Gummiindustrie beträgt 14.150 GWh/a (Seefeldt et al. 2010). Die VDMA-Studie stützt sich auf Schätzungen des VDMA und des ILK

Dresden, wonach der Anteil der Kältetechnik etwa 5% am Gesamtstromverbrauch beträgt. Daraus ergeben sich ca. 700 GWh/a (Guntram Preuß 2011). Die Studie des Bayerischen Landesamts für Umweltschutz (LfU-Bayern 2002) kommt in ihren Messungen zu einem Anteil von 10,3% am Gesamtstrombedarf.

Im untersuchten Betrieb waren nur Kompressionskälteanlagen installiert. Der COP der Anlagen, welcher zwischen Februar bis April gemessen wurden, lag inkl. Kühltürme zwischen 5,8 (bei -2 °C mittlerer Außentemperatur) und 2,8 (bei 11 °C mittlerer Außentemperatur). Berücksichtigt man die deutlich wärmeren Monate, ist im Mittel ein COP von 2 realistisch. Basierend auf den Messwerten der Studie des Bayrischen Landesamts für Umweltschutz wird für die vorliegende Studie von einem anteiligen Stromverbrauch von 10% für die Bereitstellung von Kälte ausgegangen. Hieraus ergeben sich ca. 1.410 GWh/a Elektronenergiebedarf. Der Kältebedarf kann entsprechend einer Jahresarbeitszahl von 2,0, bei einer Bereitstellungstemperatur von 6 °C, mit 2.820 GWh/a angenommen werden.

Wie oben beschrieben erfolgen Extrudier- sowie Spritzgussprozesse in der Kunststofftechnik bei Temperaturen von über 200 °C. Hieraus resultieren auch Abwärmequellen mit relativ hohem Temperaturniveau, welche für Absorptionskälteerzeugung geeignet scheinen.

5.4.8 Bau- und Baustoffindustrie

Die Hauptanwendungsgebiete der Kältetechnik in der Bauindustrie sind Bodengefrieren und Betonabbinden (DKV 2002; Guntram Preuß 2011). Für das Betonabbinden wird ausschließlich flüssiger Stickstoff verwendet, der dem Kältebedarf der chemischen Industrie zugeordnet wurde. Bei der Bodengefrierung geht der DKV-Statusbericht 22 von einem mit Sole erzeugten Kälteanteil von 0,9 GWh/a mit einem Endenergiebedarf von 0,6 GWh/a aus (DKV 2002). Die VDMA-Studie postuliert einen maximalen Endenergieeinsatz zur Kälteerzeugung in der Branche von 10 GWh/a (Guntram Preuß 2011).

Der DKV-Statusbericht 22 liefert eine nachvollziehbare Berechnung zum Kälteleistungs- und Kälteenergiebedarf. Diese Zahlen werden im weiteren Verlauf verwendet.

5.4.9 Elektro- und Elektronikindustrie

In der Elektro- und Elektronikindustrie kommt die Kältetechnik zur Kühlung von Prozessanlagen in der Halbleiter- und PV-Anlagenproduktion sowie in der Klimatisierung von Reinräumen zum Einsatz. Die VDMA Studie schätzt den Endenergiebedarf für Kälte (ohne Reinraumklimatisierung) auf 80 GWh/a (Guntram Preuß 2011).
(Brinckmann 2008) gibt Einblicke in die Anwendung von Absorptionskältemaschinen in eine große Halbleiterfabrik. Die vier ein- und sieben zweistufigen Absorptionskältemaschinen sind zur Deckung der Kühl- Grundlast bei 5°C und 11 °C Vorlauftemperatur im Einsatz. Bezogen auf eine Vorlauftemperatur von 11 °C ist eine Kälteleistung von 53,4 MW installiert. Zusätzlich dienen Turbo-Chiller mit einer Leistung von ca. 50 MW zur Spitzenlastdeckung. Entsprechend der Grundlastdeckung ist von einer hohen Vollbenutzungsstundenzahl auszugehen. Bei angenommenen 4.000 Volllaststunden der AKMs ergibt sich ein Kältebedarf von ca. 210 GWh/a. Zusätzlich werden 1.500 Volllaststunden für die Turbo-Chiller angenommen. Hieraus ergibt sich ein zusätzlicher Kältebedarf von 75 GWh/a. Die Aufteilung des Bedarfs für die Klimatisierung von Reinräumen bzw. für Prozesskälte kann aus den Angaben nicht entnommen werden. Deswegen wird eine Aufteilung zu gleichen Teilen angenommen. Es wird ein Wärmeverhältnis von 0,9 (Absorptionskälte) sowie eine Jahresarbeitszahl von 4,0

(Kompressionskälte) angesetzt. Somit ergibt sich ein Endenergiebedarf für Prozesskälte und Klimatisierung von 235 GWh/a Wärme und 18,8 GWh/a Elektroenergie. Allein der Elektroenergiebedarf für Prozesskälte an diesem Standort entspricht etwa einem Zehntel der Schätzung der VDMA-Studie (Guntram Preuß 2011).

Der gesamte Strombedarf der Branche wird entsprechend (Guntram Preuß 2011) übernommen, der Kältebedarf entsprechend einer Jahresarbeitszahl von 4,0 berechnet. Hinzu kommt ein Anteil Absorptionskälte, welcher auf den vierfachen Wert der Halbleiterfabrik in Dresden geschätzt wird.

Die Schätzung des Gesamtenergiebedarfs für die Kälteerzeugung sowie für Wärme und sonstige Prozesse ist schwierig, da Studien zum Energieverbrauch den Industriezweig Elektro- und Elektronikindustrie nicht separat erfassen (AG-Energiebilanzen-e.V. 2011; Seefeldt et al. 2010). Eine Zuordnung in den Bereich „Sonstiges verarbeitendes Gewerbe“ ist möglich. Hier liegt der gesamte Elektroendenergiebedarf bei 27,1 TWh/a. Der Kälteerzeugung für Klimaanwendungen wird ein Anteil von 770 GWh/a zugeschrieben (Seefeldt et al. 2010).

5.4.10 Fahrzeugindustrie

Die VDMA-Studie zählt zahlreiche Anwendungen der Kältetechnik in der Fahrzeugindustrie auf. Hierzu zählen z.B. die Luftkonditionierung für den Lackierprozess, Trocknungsanlagen, Prüfstände und Bereitstellung von Kühlwasser für Produktionsanlagen (Guntram Preuß 2011). Die Studie geht anhand von Beispielrechnungen für die Kältetechnik von einem Anteil von 2% am gesamten Stromverbrauch der Branche aus. Hieraus ergibt sich ein Strombedarf von 370 GWh/a. Die Studie von Prognos, ISI und TUM (Seefeldt et al. 2010) geht von einem Strombedarf von 520 GWh/a aus, diese beinhaltet jedoch die Klimatisierung.

Die Studie der ASUE weist für die Jahre 1970 bis 1995 eine installierte Absorptionskälteleistung von 17,8 MW für die Automobilindustrie aus (ASUE 1995). Berücksichtigt man die Wachstumsraten der Absorptionskälte nach (Simmert 2011) kann eine installierte Absorptionskälteleistung von 35 MW in der Automobilindustrie angenommen werden. Die Auslastung wird mit 2.000 Vollbenutzungsstunden angesetzt.

Aus Kälteanlagen der VW-Manufaktur am Standort Dresden (Haag 2009) (2 Turbomaschinen mit Wasser als Kältemittel mit je 1000 kW Kälteleistung, eine H_2O-LiBr-Absorptionskälteanlage mit 1.400 kW Kälteleistung – betrieben mit Fernwärme, eine Anlage zur freien Kühlung mit 1.212 kW Kälteleistung sowie eine Kompressionskälteanlage mit 550 kW Kälteleistung) kann aufgrund der verwendeten Kältemittel und Arbeitsstoffpaare auf Vorlauftemperaturen von ca. 6 °C geschlossen werden. Zur Hochrechnung auf die Kältebedarfe werden eine Jahresarbeitszahl von 4,0 für die Kompressionskältetechnik und ein Wärmeverhältnis von 0,7 für die Absorptionskältetechnik angenommen.

5.4.11 Maschinenbau

Hinsichtlich der Nutzung der Kältetechnik sind die Fahrzeugindustrie und der allgemeine Maschinenbau vergleichbar. Nach gleichem Schema schätzt die VDMA-Studie den Anteil der Kältetechnik am Strombedarf auf 1%. Hieraus ergibt sich ein Strombedarf für die Kältetechnik von 117 GWh/a (Guntram Preuß 2011). Die Studie von Prognos, ISI und TUM gibt einen Anteil der Kälte- und Klimatechnik von 4,5% am Branchen-Stromverbrauch an (Seefeldt et al. 2010). Für die vorliegende Studie wird ein Mittel zwischen beiden Angaben von 250 GWh/a

angenommen. Für den Kältebedarf wird analog zur Fahrzeugindustrie mit einer Jahresarbeitszahl von 4,0 kalkuliert.

Angaben zur Verwendung von Absorptionskältemaschinen im Maschinenbau sind in den vorliegenden Studien nicht zu finden (ASUE 1995; DKV 2002; Guntram Preuß 2011; Seefeldt et al. 2010).

5.4.12 Kompressoren und Druckluftanlagen

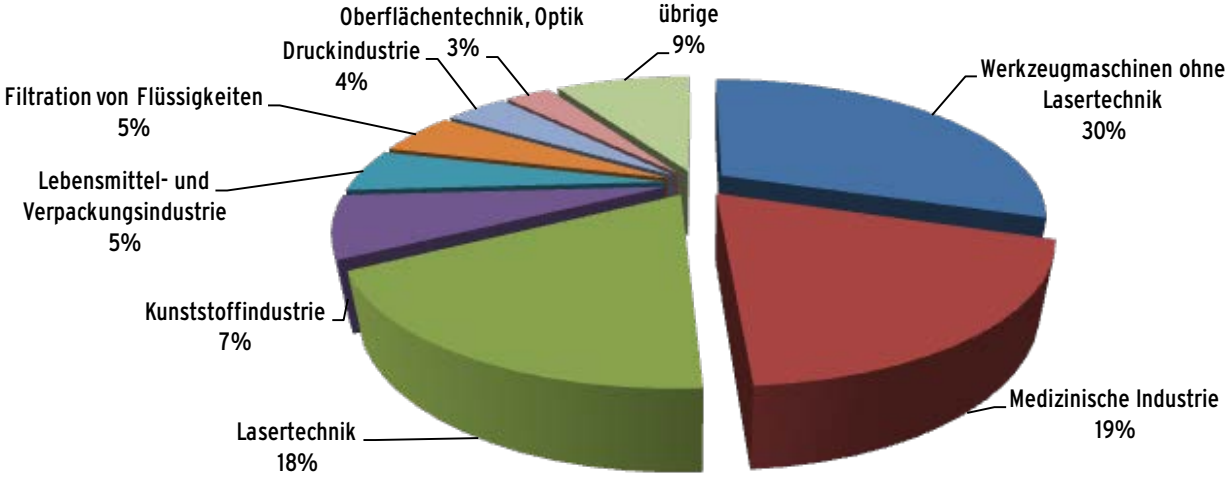
Aufgrund der verfügbaren Daten erfolgt in der VDMA-Studie (Radgen & Blaustein 2001) eine separate Betrachtung der Druckluftanlagen. Die Kältetechnik wird hier für die Entfeuchtung der Luft angewendet. Aus den Angaben wird ein Stromverbrauch für die Druckluftkältetrocknung von 94 GWh/a berechnet (Guntram Preuß 2011). Druckluftkältetrockner arbeiten mit einem Taupunkt von 3°C. Daraus kann eine Jahresarbeitszahl 4,0 (da Bedarf über das Jahr konstant) abgeleitet werden. Bei der Drucklufterstellung entsteht Abwärme. Anstatt des Einsatz der Abwärme in Absorptionskälteanlagen zur Luftkühlung bis zum Erreichen des Taupunktes, kann diese sinnvoller zur Regeneration von gesättigtem Sorptionsmittel zur Trocknung der Luft verwendet werden.

5.4.13 Prozesskälte (Flüssigkeitskühlsätze) für industrielle Anwendungen

Die VDMA-Studie verweist auf eine eigene Studie, welche detaillierte Informationen zum Einsatz von Flüssigkeitskühlsätzen in der Industrie bietet. Ein Großteil der Kälteanlagen kommt in der Metallverarbeitung zur Kühlung von Werkzeugmaschinen zum Einsatz. Eine Detaillierung nach Industriebereichen liegt jedoch nicht vor. In der VDMA-Studie werden bereits behandelte Industriebereiche herausgerechnet (siehe Abbildung 29). Die verbleibenden Bereiche betreffen wesentlich die Metall- und die Holzbearbeitung. Die Studie nennt einen Endenergiebedarf von 504 GWh/a. Unter der Annahme, dass nur Anlagen mit Kompressionskältemaschinen gezählt wurden, und ein COP von 3,5 erreicht wird (gegenüber chemischer Industrie eher kleinerer Anlagen), ergibt sich ein Kältebedarf von 1.764 GWh.

Ausgehend von der ASUE-Statistik wurden in den Jahren 1970 bis 1995 in den Branchen Metall- und Holzbearbeitung Ab- und Adsorptionskälteanlagen mit einer Kälteleistung von ca. 15 MW installiert (ASUE 1995). Mit den aktuellen Installationsraten nach (Simmert 2011) korrigiert, kann von einer installierten wärmegetriebenen Kälteleistung von ca. 30 MW ausgegangen werden. Bei einer angenommenen Vollbenutzungsstundenzahl von 2.000 h/a ergibt sich ein zusätzlicher Kälteenergiebedarf von 60 GWh/a. Bei einem Wärmeverhältnis von 0,7 entsteht ein Endenergiebedarf in Form von Wärme von 85 GWh/a.

Abbildung 29: Prozesskühlung mit Flüssigkeitskühlsätzen – Umsatz der Hersteller nach Kundenbranchen (Guntram Preuß 2011)



5.4.14 Schaltschrankkühlung

Die VDMA Studie (Guntram Preuß 2011) nennt eine Stückzahl von 313.000 Einheiten für die Kühlung von Schaltschränken mit aktiver Kühlung, für die Kühlung von Leistungselektronik, MSR-Technik, kleinen Serverschränken sowie von Serverräumen. Die Abgrenzung zu Rechenzentren, welche der Klimatisierung zugeordnet sind, ist schwierig, da kein Zuordnungskriterium (Größe oder Leistungsbedarf der Schränke) vorliegt bzw. benannt wird. Die Studie kommt auf einen elektrischen Endenergiebedarf von 313 GWh/a.

Bei den meisten Schaltschränken besteht ein Kühl- und weniger ein Kältebedarf. Für die meisten elektronischen Kernkomponenten sind Temperaturen um 60 °C akzeptabel. Jedoch kommen Kälteanlagen oft wegen der extrem großen Wärmestromdichte zu Einsatz. Ob es sich bei den angegebenen 313.000 Einheiten um Anlagen mit Kühlung, und falls ja, mit oder ohne Kältemaschine handelt, legt die Studie nicht dar. Beispielhaft wurden einige Analysen zur Schaltschrankklimatisierung ausgewertet. Hierbei erfolgte die Wärmeabfuhr teileweise mit und teilweise ohne Kältemaschine. Die COP lagen für beide Systeme zwischen Werten unter 1,0 bis maximal 2,1 (neue Seriengeräte) (eCool 2011; Nelles et al. 2011; Scholl & Koch 2011). Für die Berechnung des Kältebedarfs wird ein COP von 1,2 angenommen.

Es existiert ein erhebliches Potenzial zur Energieeinsparung z. B. durch die Anwendung von Systemen, welche ähnlich einer freien Kühlung arbeiten (nur Umwälzpumpe für das Kältemittel) (Marcinichen et al. 2010).

5.5 Nahrungsmittelherstellung

Die VDMA-Studie gliedert diese Branche in 3 Hauptbereiche:

- Nahrungsmittelindustrie
- Milchviehbetriebe und
- Brauereien

5.5.1 Nahrungsmittelindustrie

In der VDMA-Studie werden hier diejenigen Bereiche zusammengefasst, die nicht zu Brauereien und Milchviehbetrieben gehören. Dieser Bereich umfasst somit

- Schlachthöfe,
- Fleischverarbeitung,
- Fischverarbeitung,
- Obst- und Gemüseverarbeitung,
- Betriebe zur Milchverarbeitung und Speiseeisherstellung sowie
- Betriebe zur Herstellung von Backwaren (ohne Dauerbackwaren).

Das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz liefert in seinem statistischen Jahrbuch für die einzelnen Sektoren sehr genaue Aufschlüsselungen zum Endenergiebedarf auf Basis von von Strom, Erdgas, Heizöl und Kohle (Ernährung 2009), jedoch finden sich an keiner Stelle detaillierte Angaben zum Kältebedarf und dem damit verbundenen Endenergiebedarf. Die VDMA Studie untergliedert diese Bereiche vor diesem Hintergrund in Betriebsgrößen (nach Mitarbeitern) und ordnet diesen Kälteanlagen mit einer mittleren Leistung zu. Weiterhin erfolgt eine Aufteilung in Normal- und Tiefkühlung im Verhältnis 60:40 bezogen auf den Kälteleistungsbedarf (Guntram Preuß 2011). Der DKV-Statusbericht nennt spezifischen Endenergiebedarf für Kältetechnik in Fleischereien (15 kWh_{el}/Schwein, andere Tiere wurde über Faktoren korreliert), in Bäckereien (2,06% des Gesamtstrombedarfs) und für die Fruchtsaftherstellung (12 Wh Kälte/l) (DKV 2002).

Die Zahlen zum Kältebedarf und dem damit verbundenen Endenergiebedarf gehen zwischen dem DKV-Statusbericht 22 und der VDMA-Studie sehr weit auseinander. Während der DKV-Statusbericht den Kältebedarf auf 52.487 GWh/a schätzt, nennt die VDMA-Studie einen Wert von 12.322 GWh/a. Auch der Endenergiebedarf weist eine ähnlich deutliche Abweichung mit 18.562 GWh/a zu 6.027 GWh/a auf. Die zugrunde gelegten mittleren Jahresarbeitszahlen von 2,8 zu 2,0 differieren ebenfalls deutlich (DKV 2002; Guntram Preuß 2011). Bei einem Strombedarf der Branche (ohne Brauereien und Milchviehbetriebe) von ca. 17.000 GWh/a (Ernährung 2009; Seefeldt et al. 2010) erscheinen die Werte der DKV-Studie als zu hoch eingeschätzt. Es werden daher die Werte der VDMA-Studie genutzt.

Die Studie der ASUE listet für den Lebensmittelbereich über 20 Beispiele von installierten Absorptionskälteanlagen mit einer Gesamtkälteleistung von über 23 MW (ASUE 1995). Eine nähere Recherche ergab, dass als Wärmequelle der indirekt beheizten Anlagen Abwärme aus BHKW zum Einsatz kommt. Für die Nutzung von Prozessabwärme als Antriebsenergie konnten keine Nachweise gefunden werden. Aus Untersuchungen am ILK Dresden über den Einsatz der Absorptionskältetechnik in der Backwarenindustrie ist bekannt, dass der Abwärmeanfall und der Kältebedarf zeitlich oft nicht korrelieren. Die Nutzung in wärmegetriebenen Kälteanlagen erfordert daher zusätzlich Kälte- bzw. Wärmespeicherung.

Betrachtet man den Bedarf der Energieträger Erdgas, Erdöl, Kohle und Fernwärme, ergeben sich für die Branche ca. 40.000 GWh/a (AG-Energiebilanzen-e.V. 2011; Ernährung 2009). Hieraus kann auf vielfältige Möglichkeiten für die Anwendung der KWKK in der Branche geschlossen werden.

Prinzipiell lassen sich auch zur Kälteerzeugung nutzbare Abwärmequellen in der Nahrungsmittelherstellung nachweisen, z.B.

- Rauchgase von Gas- oder ölbetriebenen Wärmeerzeugung (eine Auskühlung im Prozess ist oft nur bis zu Nutztemperatur möglich, z.B. Bäckerei) und

- Schwaden aus Backbetrieben.

5.5.2 Milchviehbetriebe

Milchviehbetriebe weisen einen Kältebedarf für die Sturzkühlung auf, bei der frische Milch von 35 °C auf ca. 2 °C in kurzer Zeit abgekühlt wird. Ein Teil der Abkühlung wird durch eine Trinkwasser-Vorerwärmung über einen vorgeschalteten Wärmeübertrager geleistet.

Die VDMA-Studie ermittelt einen Kälteenergiebedarf von 1.049 GWh/a und gibt einen zugehörigen Endenergieverbrauch in Form von Strom mit 583 GWh/a für die Kälteerzeugung an. Das entspricht einem Anteil von ca. 7,5% am Kältebedarf und 8,5 % am Endenergieverbrauch der Nahrungsmittelindustrie (Gruntram Preuß 2010).

5.6 Gebäudeklimatisierung

Die VDMA-Studie rechnet dem Bereich Klimakälte neben der Komfortklimatisierung auch andere Klimatisierungsanwendungen zu. So wird z.B. der Kältebedarf für Rechenzentren, Fabrikhallen und Reinräume der Klimatisierung zugeschlagen (Guntram Preuß 2011).

Eine Abgrenzung der Gebäudeklimatisierung von der Klimatisierung im Gewerbebereich (Kaufhäuser, etc.) ist anhand der vorliegenden Daten nicht möglich. Hierzu können andere Studien, wie z.B. Vorstudien zur Ökodesignrichtlinie der Europäischen Union (Ecodesign 2008), Aufschluss geben.

Für die Berechnung des Kältebedarfs für die Klimatisierung wurde pauschal eine Jahresarbeitszahl von 2,9 verwendet. Dieser Wert entspricht nach DIN V 18599-7 dem EER für ein Multi-Split-System sowie einem zugehörigen mittleren Teillastfaktor von 1,0 (DIN-V-18599 2007).

Für die Absorptionskälteanlagen erfolgt die Berechnung der Kältebedarfe für die Klimatisierung auf Basis eines Wärmeverhältnisses von 0,71. Dies entspricht nach DIN V 18599-7 dem Nennwärmeverhältnis von H_2O-LiBr-Absorptionskältemaschinen unter den folgenden Temperaturbedingungen: Kaltwasser 6/14 °C, Kühlwasser 27/33, Heizmedium 80/70 (DIN-V-18599 2007).

Der Klimakälte kommt aufgrund starker Zuwachsraten von 3,5 bis 5 %/a, bezogen auf die installierte Kälteleistung (Ecodesign 2008) (siehe Abbildung 30), in Zukunft eine steigende Bedeutung für die Klimarelevanz zu. Aufgrund der Lebensdauer von Klimaanlagen von etwa 15 Jahren ist insbesondere bei der Vielzahl der prognostizierten Neuinstallationen (vgl. Abbildung 31) auf eine nachhaltige Auslegung der Anlagen zu achten. Die aus den Vorstudien zur Ökodesign Richlinie „Los ENTR 1 – Raumklimaanlagen“ (Ecodesign 2008) entnommen folgenden Abbildungen der Marktanalyse stellen diesen Trend deutlich heraus.

Abbildung 30: Entwicklung der installierten Kälteleistung im Klimakältebereich (Ecodesign 2008)

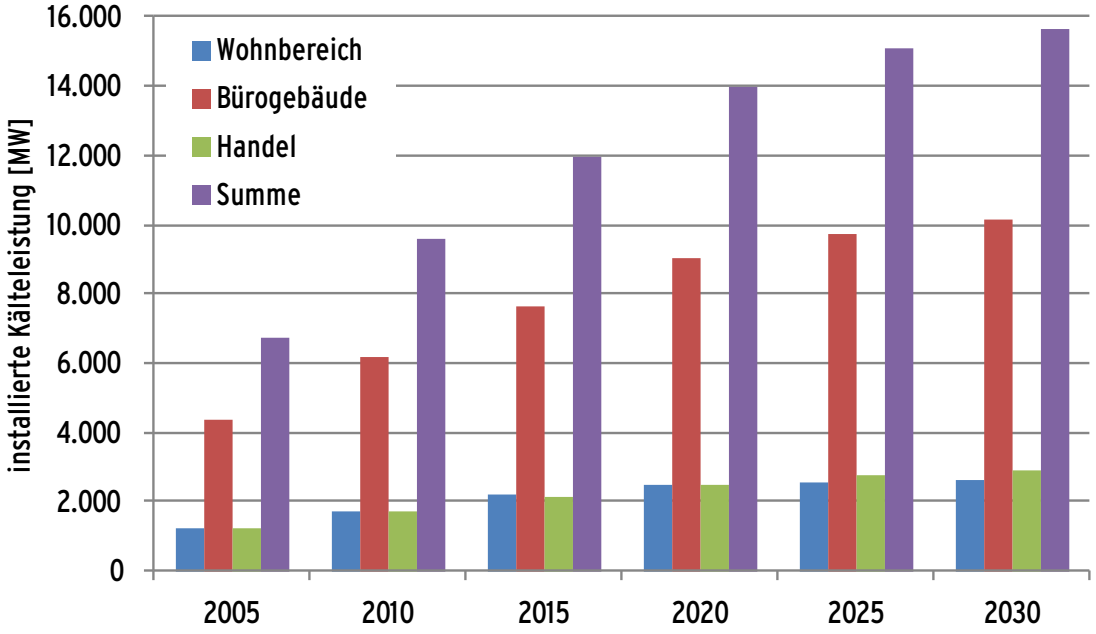
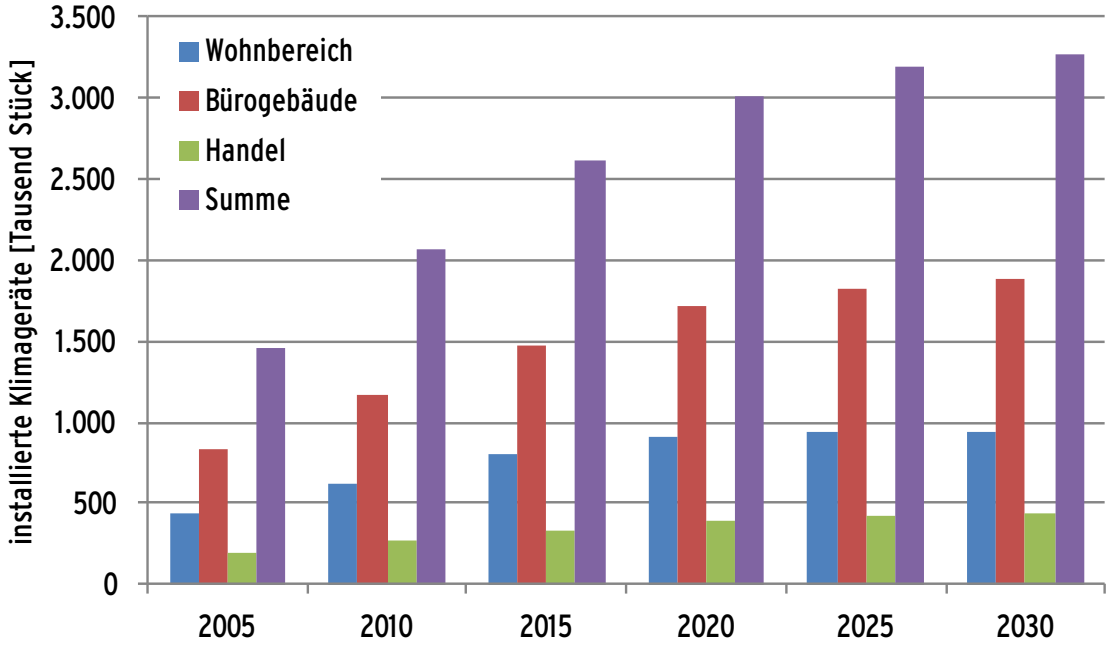


Abbildung 31: Entwicklung der Anzahl der installierten Klimageräte (Ecodesign 2008)



5.7 Darstellung der Ergebnisse

Tabelle 7: Kälte-, End- und Primärenergiebedarf nach Anwendungsgebiet

Bereich	Kälteenergiebedarf [GWh/a]			Endenergiebedarf [GWh/a]			Primärenergie-bedarf [GWh/a]
	Summe	davon KKM	davon AKM	Summe	Strom	Wärme	
Industriekälte	18.296	16.831	1.465	15.070	13.030	2.091	35.376
Nahrungsmittelherstellung	14.091	13.845	246	7.258	6.766	493	17.935
Gebäudeklimatisierung	30.786	30.299	487	11.134	10.448	686	27.645
Summe	**63.173**	**60.975**	**2.199**	**33.463**	**30.243**	**3.269**	**80.956**

Abbildung 32: Kältebedarf (Nutzenergie) der betrachteten Branchen

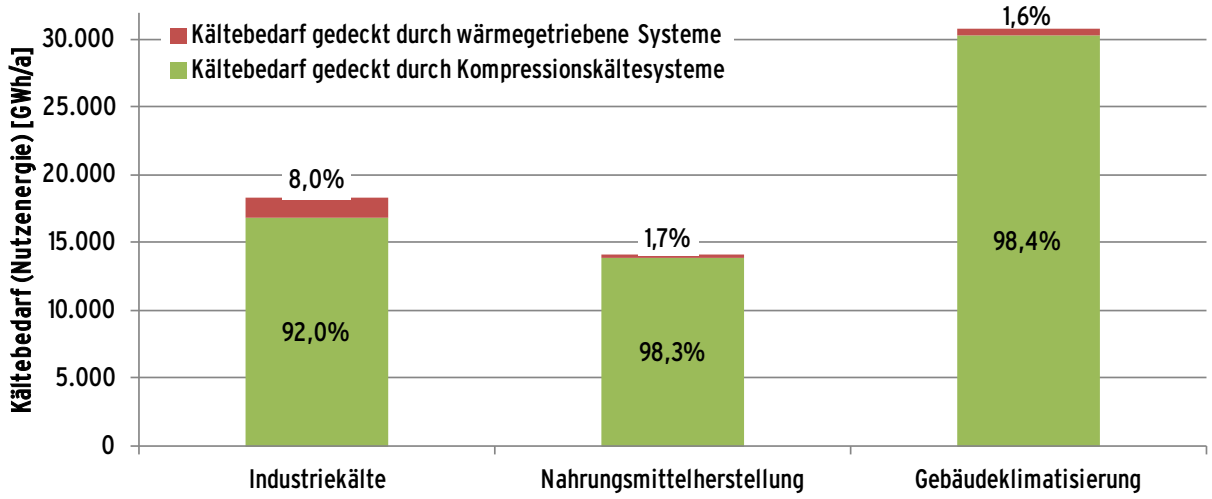


Abbildung 33: Kältebedarf (Nutzenergie) und hierfür benötigter elektrischer und thermischer Endenergiebedarf der betrachteten Anwendungsgebiete

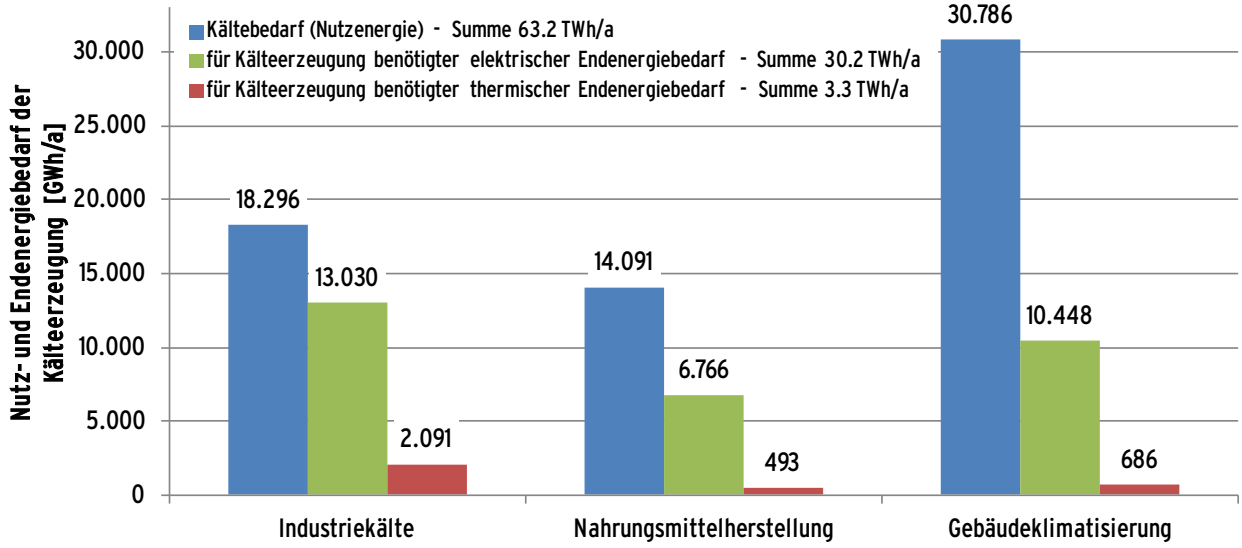


Tabelle 8: Kälte-, End- und Primärenergiebedarf nach Branchen, inkl. Untergruppen

Grün hinterlegt sind die Temperaturbedingungen, welche für eine einstufige Absorptionskältemaschine mit dem Stoffpaar H_2O-LiBr geeignet ist

Branche			Kältebedarf [GWh/a]				Endenergiebedarf [GWh/a]			Primärenergiebedarf [GWh/a]
Hauptgruppe	Nebengruppe	Untergruppe	Summe	davon KKM	davon AKM	bei t_{Bedarf} [°C]	Summe	Strom	Wärme	
Industriekälte	Bergbau, Gewinnung von Steinen und Erden (nur Steinkohleabbau)		560	560	0	3	160	160	0	416
	Papier- und Zellstoffindustrie		252	252	0	6	90	90	0	269
	Druckindustrie		679	644	35	20	105	55	50	178
	übrige chemische Industrie ohne Luft- und Gasverflüssigung		6.065	5.265	800	-4	3.090	1.950	1.140	5.868
	übrige chemische Industrie: nur Luft- und Gasverflüssigung		1.120	1.120	0	-190	7.540	7.540	0	19.604
	Pharmazeutische Industrie		933	853	80	6	328	213	115	635
	Kunststoff- und Gummiverarbeitung		2.820	2.820	0	6	1.410	1.410	0	3.666
	Bau- und Baustoffindustrie		1	1	0	-25	1	1	0	2
	Elektro- und Elektronikindustrie (auch Leiterplattenfertigung und Löten, Halbleiterfertigung)		740	320	420	5	680	80	600	628
	Fahrzeugindustrie		1.550	1.480	70	6	470	370	100	1.032
	Maschinenbau		1.000	1.000	0	6	250	250	0	650
	Kompressoren, z.B. zur Drucklufterzeugung, Drucklufttrocknung (mit Kältesystemen)		376	376	0	3	94	94	0	244
	Prozesskälte (Flüssigkeitskühlsätze) für industrielle Anwendungen		1.824	1.764	60	6	590	504	86	1.370
	Schaltschrankkühlung		376	376	0	20	313	313	0	814
Nahrungsmittelherstellung	Nahrungsmittelindustrie	Betriebe ab 50 Beschäftigte NK	5.314	5.208	106	0	1.805	1.627	177	4.355
		Betriebe ab 50 Beschäftigte TK	3.543	3.472	71	-25	2.492	2.315	177	6.142
		Betriebe 20...49 Beschäftigte NK	1.323	1.297	26	0	543	499	44	1.327
		Betriebe 20...49 Beschäftigte TK	882	864	18	-25	764	720	44	1.904
		Nebenprozesse NK	757	742	15	0	322	297	25	789
		Nebenprozesse TK	504	494	10	-25	474	449	25	1.185
	Brauereien		719	719	0	-7	276	276	0	717
	Milchviehbetriebe		1.049	1.049	0	4	583	583	0	1.516
Gebäudeklimatisierung	Gewerbe Handel Dienstleistungen		9.052	8.677	375	6	3.520	2.992	528	8.149
	Industrie		17.672	17.560	112	6	6.213	6.055	158	15.854
	Rechenzentren und Server		3.335	3.335	0	6	1.150	1.150	0	2.990
	Haushalte		728	728	0	6	251	251	0	653
Summe			**63.173**	**60.975**	**2.199**	**-2**[5]	**33.513**	**30.243**	**3.269**	**80.956**

[5] mittlere Temperatur der Kälteerzeugung, Energiemengen-bezogener Mittelwert

Tabelle 9: Strom- und Wärmebedarf, sowie dessen Deckung in den einzelnen Branchen und Untergruppen

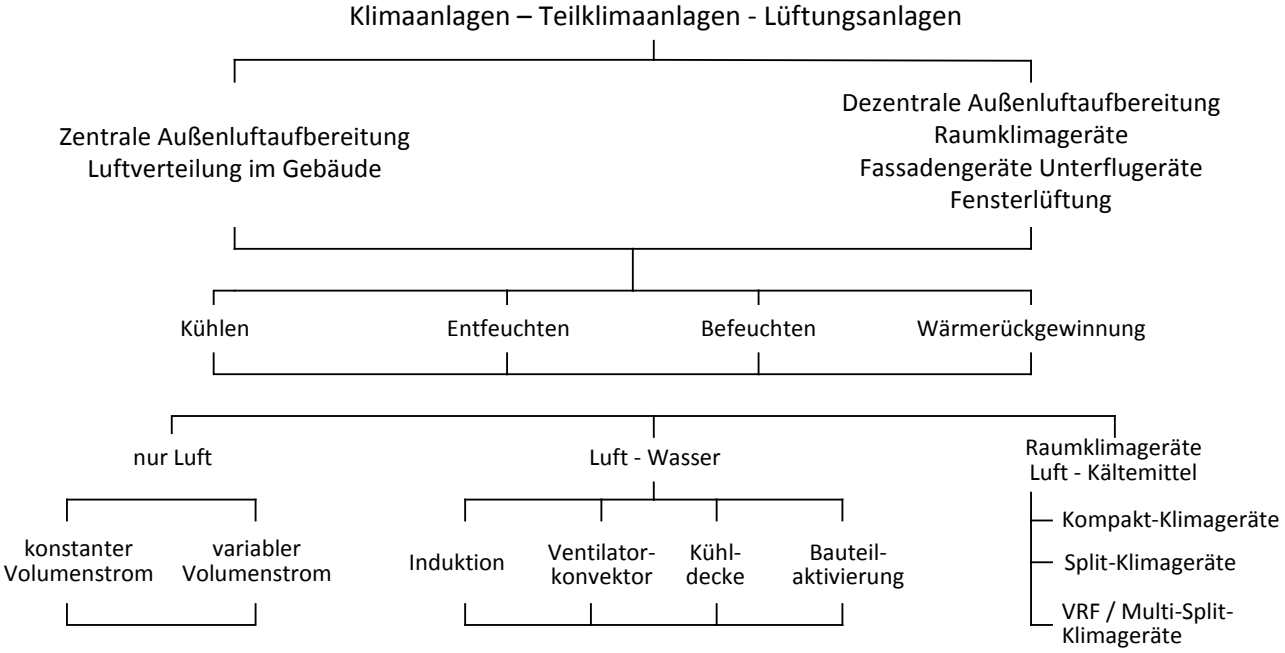
Branche				Wärmebedarf [GWh/a]						
Haupt-gruppe	Nebengruppe	Untergruppe	Strom-bedarf [GWh/a]	Summe	davon Fern-wärme	davon erneuer-bare En.-Quellen	davon Stein- und Braun-kohle	davon Mineral-öle	davon Erdgas u. andere Gase	davon sonstige
Industriekälte	Bergbau, Gewinnung von Steinen und Erden (nur Steinkohleabbau)		2.316	2.960	15	10	710	252	0	0
	Papier- und Zellstoffindustrie		22.350	45.050	4.230	8.660	3.910	1.420	26.210	590
	Druckindustrie		1.100	0	0	0	0	0	0	0
	übrige chemische Industrie ohne Luft- und Gasverflüssigung		36.290	100.650	24.650	7.010	2.710	3.620	4.695	2.250
	übrige chemische Industrie: nur Luft- und Gasverflüssigung		7.540	0	0	0	0	0	0	0
	Pharmazeutische Industrie									
	Kunststoff- und Gummiverarbeitung		14.150	8.500	1.310	70	80	1.340	5.590	40
	Bau- und Baustoffindustrie		8.740	52.870	100	7.260	18.300	7.900	14.900	5.220
	Elektro- und Elektronikindustrie (auch Leiterplattenfertigung und Löten, Halbleiterfertigung)									
	Fahrzeugindustrie		19.640	16.780	4.040	50	370	1.080	11.110	0
	Maschinenbau		11.700	12.730	1.550	40	50	2.900	8.190	0
	Kompressoren, z.B. zur Drucklufterzeugung, Drucklufttrocknung (mit Kältesystemen)		14.000	0	0	0	0	0	0	0
	Prozesskälte (Flüssigkeitskühlsätze) für industrielle Anwendungen		14.320	17.480	320	70	250	2.810	14.010	10
	Schaltschrankkühlung									
Nahrungsmittelherstellung	Nahrungsmittel-industrie	Betriebe ab 50 Beschäftigte NK	6.348	14.705	885	270	889	2.370	10.156	143
	Nahrungsmittel-industrie	Betriebe ab 50 Beschäftigte TK	6.348	14.705	885	270	889	2.370	10.156	143
	Nahrungsmittel-industrie	Betriebe 20...49 Beschäftigte NK	1.247	2.889	174	53	175	466	1.993	28
	Nahrungsmittel-industrie	Betriebe 20...49 Beschäftigte TK	1.247	2.889	174	53	175	466	1.993	28
	Nahrungsmittel-industrie	Nebenprozesse NK	400	926	56	17	56	149	639	9
	Nahrungsmittel-industrie	Nebenprozesse TK	400	926	56	17	56	149	639	9
	Brauereien		1.070	2.660	60	20	110	460	2.020	0
	Milchviehbetriebe									
Gebäudeklima-tisierung	Gewerbe Handel Dienstleistungen		140.260	240.980	32.840	3.770	3.250	93.070	108.050	0
	Industrie		199.820	440.660	42.170	27.250	88.080	39.490	222.630	21.040
	Rechenzentren und Server									
	Haushalte		139.200	798.860	81.850	73.380	13.210	255.100	365.920	9.400
Summe			648.486	1.777.220	195.365	128.270	133.270	415.412	808.901	38.910

6 Marktübersicht klimafreundlicher Kühltechniken

6.1 Einordnung von Klimasystemen und RLT-Anlagen

Zur Klimatisierung bzw. zur Kühlung (Teilklimatisierung ohne Feuchteregelung) eines Gebäudes gibt es eine Vielzahl von technischen Anlagenkonzepten. Die DIN V 18599-7 (DIN-V-18599 2007), welche das Rechenwerk für die Umsetzung der EnEV2009 (EnEV 2009) bereitstellt, gibt folgende Einteilung von RLT-Anlagen wieder (Abbildung 34).

Abbildung 34: Systematik von RLT-Anlagen in Nichtwohngebäuden (DIN-V-18599 2007)



Zur Beurteilung der Klimafreundlichkeit verschiedener Systeme gibt es mehrere Ansatzpunkte, welche sich teilweise auf Systemdetails (mikroskopische Einflüsse) oder auf das Systemkonzept beziehen (makroskopische Einflüsse).

Systemdetails, welche einen hohen Einfluss auf die Klimafreundlichkeit von RLT-Systemen aufweisen sind z.B. das verwendete Kältemittel mit dem resultierenden direkten und indirekten Einfluss auf die CO_2-Emissionen (TEWI), die verwendete Kältemittelfüllmenge, die Wärmeübertrageroberfläche mit den dadurch realisierbaren Kälteträger/Kältemitteltemperaturen, etc..

In Tabelle 10 sind positive und negative Eigenschaften verschiedener Systemkonzepte hinsichtlich ihrer Klimawirksamkeit und Energieeffizienz zusammengefasst.

Tabelle 10: Auswirkungen von Systemkonzepten im Hinblick auf die Nachhaltigkeit

negative Effekte	Systemkonzept	positive Effekte
hohe Kältemittelmengen	**Direkt-verdampfend**	Einsparung eines zusätzlichen Zwischen-kreises mit zusätzlichem Wärmeübertrager → minimale Kälteerzeugungstemperatur liegt näher an Nutztemperatur schnelle Regelbarkeit mit Anpassung an Nutzerbedingungen
hohe Kältemittelmengen	**Luftgekühlt**	Einsparung eines zusätzlichen Zwischen-kreis mit zusätzlichem Wärmeübertrager → maximale Kältekreislauftemperatur liegt näher an Umgebungstemperatur
hohe Kältemittelmengen	**Direkt-verdampfend + Luftgekühlt**	Freie Kühlung (Umpumpen des Kältemittels) möglich
zusätzlicher Pumpenaufwand zusätzlicher Wärmeübergang → minimale Kälteerzeugungstemperatur ist tiefer gegen-über einem Direktverdampfungssystem, freie Kühlung nicht möglich	**zusätzlicher Kälteträger**	geringe Kältemittelmengen
beinhaltet bewegte Teile in Hauptkomponente Verdichter → eingeschränkte Lebensdauer	**Kompressionskältesystem**	hohe Energieeffizienz bei niedrigen Temperaturdifferenzen möglich Leistung gut regelbar
gegenüber Kompressionskältesystemen höherer Abwärmemenge schlechte Energieeffizienz bei sehr kleinen Temperaturdifferenzen	**Thermische Kälteerzeugung**	Nutzung von Abwärme als Antrieb möglich Thermischer Verdichter → keine bewegten Teile und hohe Lebensdauer
Entfeuchtung muss vermieden werden → Begrenzung Kühlleistung durch begrenzte Vorlauftemperatur (Taupunkt) Höhere Kältebedarf durch Strahlungsaustausch mit den weiteren Wänden (→ gesamt tieferes Temperaturniveau der Gebäudewände → höherer Wärmeeintrag von außen)	**Kühldecke zur Kälteübergabe**	kein Energiebedarf für Ventilatoren notwendig höhere Lufttemperatur bei gleicher operativer Temperatur (gefühlte Temperatur, Mittelwert der Luft- und Strahlungstemperatur) leise, niedrige Luftgeschwindigkeiten
bei ausschließlicher Anwendung als RLT-System hoher Energiebedarf für Lufttransport (Ventilator)	**DEC oder offener Sorptionsprozess**	Abwärme/ Solarwärme als Antrieb zur Entfeuchtung

Neben einer Einteilung nach DIN-V-18599 kann für Teilbereiche der Klimatisierung eine weitere Klassifizierung erfolgen. Betrachtet man den Bereich der Teilklimatisierung ohne Feuchteregelung kann auf eine detailliertere Klassifizierung entsprechend Abbildung 35 verwiesen werden. In vielen Punkten ist ein höherer Detailierungsgrad möglich.

Bei der Betrachtung thermischer Kälteerzeugungsverfahren ist zwischen offenen und geschlossenen Prozessen zu unterscheiden. Einen detaillierten Überblick hierzu liefert die Abbildung 36.

Abbildung 35: Klassifizierung von Teil-Klimaanlagen (nur Kühlen)

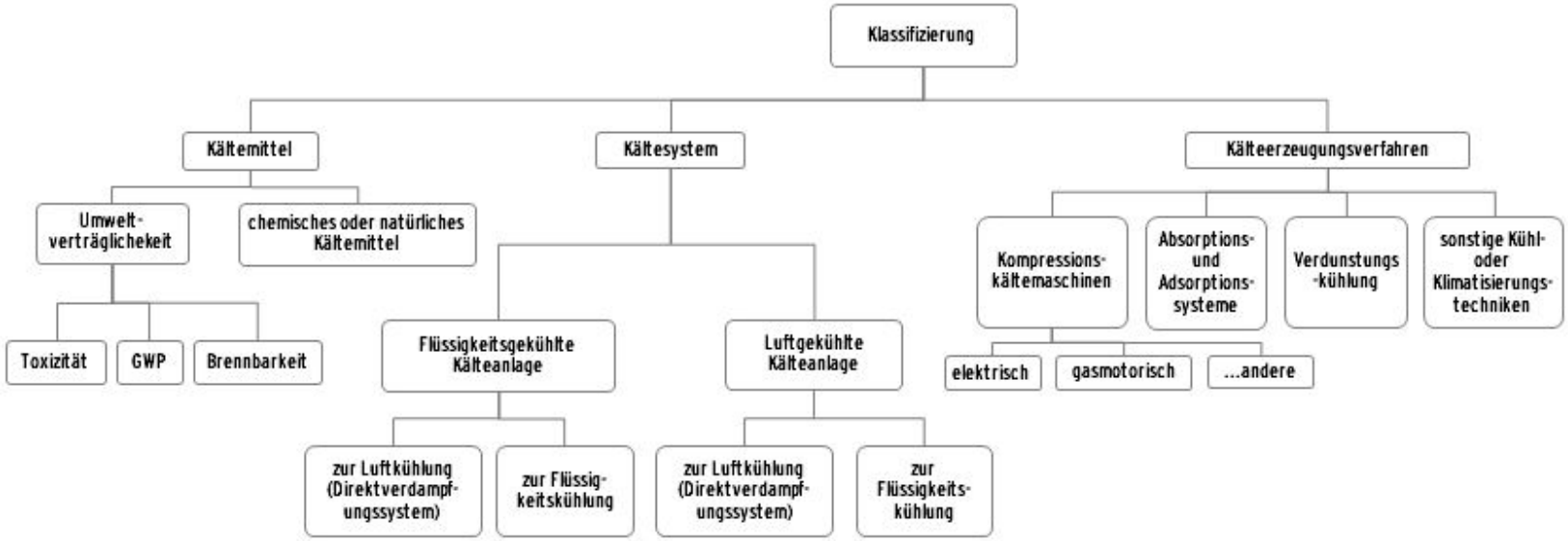
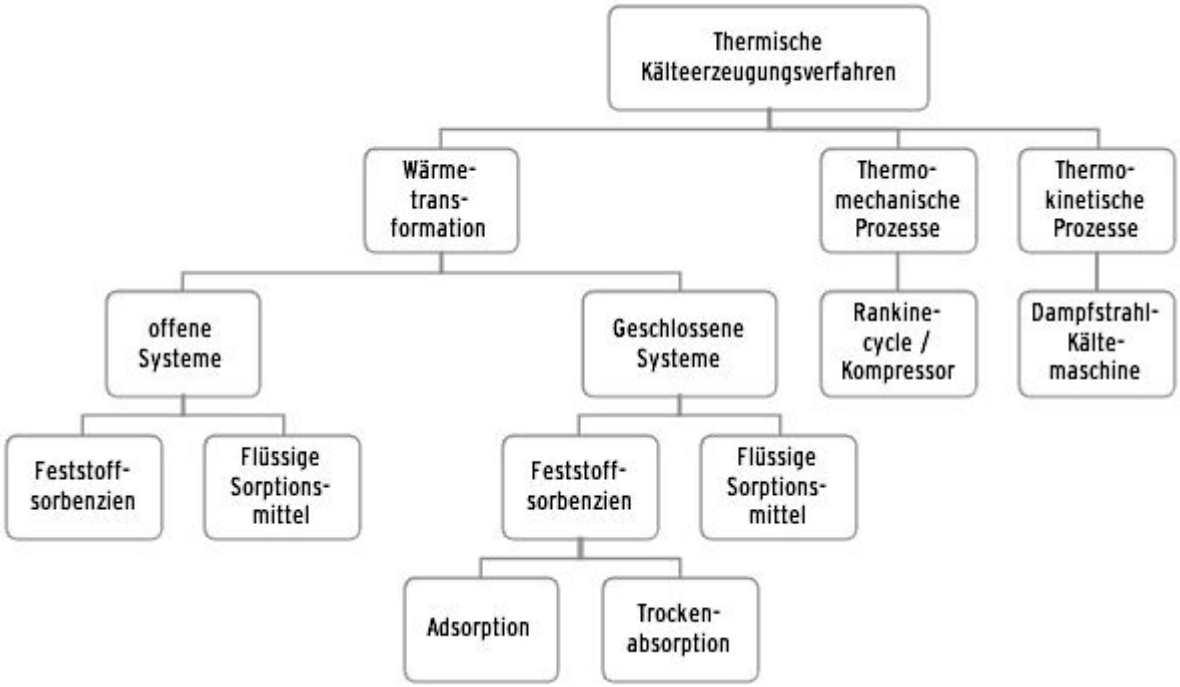


Abbildung 36: Einteilung der thermischen Kälteerzeugungsverfahren



In den folgenden Abschnitten wird näher auf die einzelnen Verfahren der Kälteerzeugung eingegangen.

Für die Kompressionskältesysteme wird der Einfluss der Kältemittel auf die Klimaverträglichkeit diskutiert und ein Überblick über am Markt verfügbare Verdichter und Kaltwassersätze für den Einsatz natürlicher Kältemittel gegeben. Abschließend erfolgt eine tabellarische Übersicht zu installierten Kälteanlagen mit natürlichen Kältemitteln.

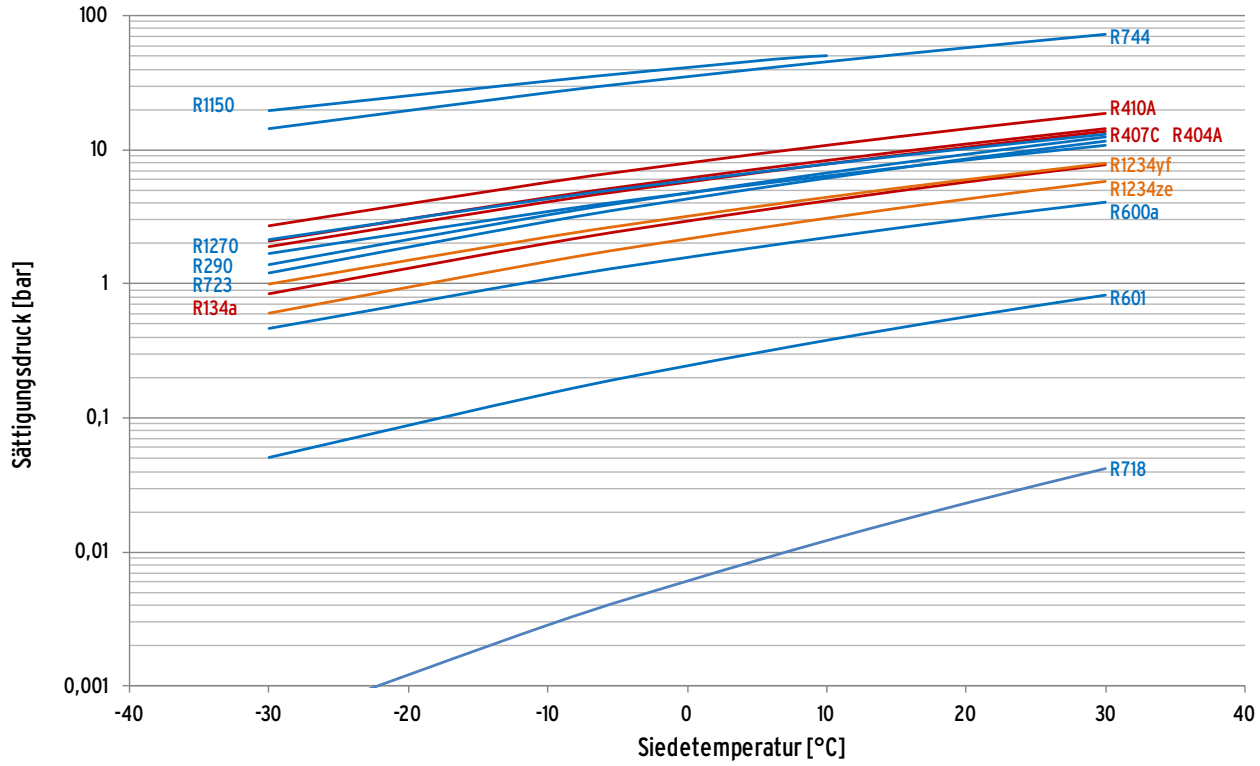
Bei der Beschreibung der thermischen Kälteerzeugungsverfahren liegt der Schwerpunkt auf geschlossenen Verfahren (Ab- und Adsorptionskältesysteme), die für die meisten Klimatisierungs- und Kühlaufgaben eingesetzt werden. Dabei wird näher auf Schaltungsvarianten und Arbeitsstoffpaare bezüglich deren Einsatzgrenzen, deren Einfluss auf das Anlagenverhalten und das erreichbare Wärmeverhältnis eingegangen. Daran schließt sich ein Überblick über marktverfügbare Anlagen an, welcher durch umgesetzte Anlagenkonzepte illustriert wird. Darüber hinaus werden geschlossene Verfahren, die hauptsächlich im Bereich der Gebäudeklimatisierung zum Einsatz kommen, erläutert.

6.2 Kompressionskälteanlagen

6.2.1 Vergleich von Kältemitteln

Die Kältemitteleigenschaften in einem Kaltdampfprozess beeinflussen sowohl die energetische Effizienz als auch die Konstruktion der Kälteanlage hinsichtlich Drucklage, Größe und Verdichtungsprinzip. Ein Austausch von Kältemitteln in bestehenden Kälteanlagen ist nur sehr eingeschränkt möglich (vgl. Drop-In-Kältemittel[6]). Abbildung 25 auf Seite 64 lieferte einen Überblick über die Treibhauspotenziale sowie die sicherheitstechnische Einteilung nach DIN EN 378 gängiger Kältemittel. Die folgenden Darstellungen liefern Angaben zur Drucklage in Abhängigkeit der Temperatur (Abbildung 37), kritischen Temperatur und kritischem Druck (Abbildung 38), den kälteleistungsspezifischen Sauggasvolumenströmen (Abbildung 39) sowie den Druckverhältnissen in Abhängigkeit der Verdampfungstemperatur (Abbildung 40). Fluorhaltige Kältemittel sind rot (HFKW) bzw. orange (ungesättigte HFKW), natürliche Kältemittel blau dargestellt.

Abbildung 37: Drucklagen unterschiedlicher Kältemittel (natürliche KM (blau), HFKW (rot), ungesättigte HFKW (orange))



[6] Drop-In-Kältemittel sind Kältemittel, welche für den direkten Austausch eines Kältemittels (z.B. ein FCKW-haltigen Kältemittel welches im Rahmen des Montreal-Protokolls verboten wurde) entwickelt bzw. in Abstimmung der Kältemittel- und Verdichterhersteller ausgewählt wurden. Durch Neubefüllung, nach Evakuieren und Ölaustausch, kann die bestehende Kälteanlage ohne wesentliche Veränderung der Kreislaufparameter, wie Drucklage und Kälteleistung, weiterbetrieben werden. Klassische Beispiele sind R134a für R12, R507 für R502.

Abbildung 38: Kritische Temperaturen und Drücke unterschiedlicher Kältemittel (natürliche KM (blauer Rahmen), HFKW (roter Rahmen), ungesättigte HFKW (oranger Rahmen))

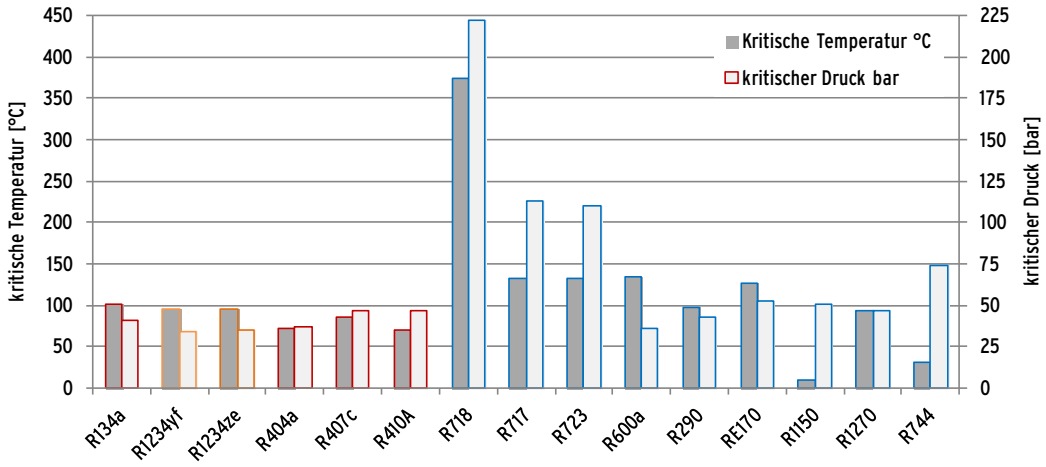


Abbildung 39: Sauggasvolumenströme bezogen auf eine Kälteleistung von 1 kW in Abhängigkeit der Verdampfungstemperatur

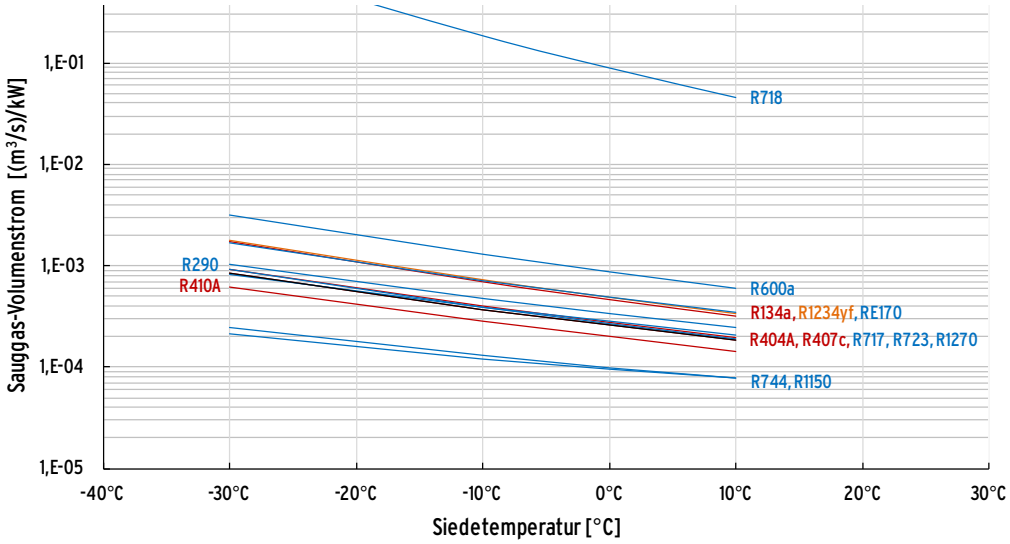
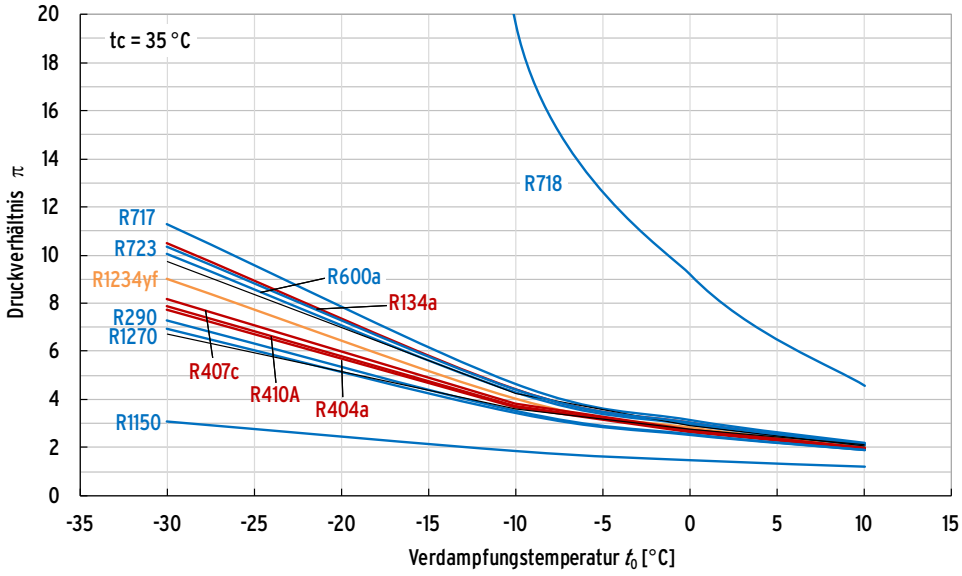


Abbildung 40: Druckverhältnis zwischen Kondensations- und Verdampfungsdruck in Abhängigkeit der Verdampfungstemperatur bei einer Kondensationstemperatur von 35 °C



Zur Schätzung der erreichbaren Leistungszahlen der einzelnen Kältemittel wird ein einstufiger Kreisprozess entsprechend Abbildung 41 simuliert. Die erzielten Ergebnisse sind Richtwerte. Durch kältemittelspezifische Anpassungen der Anlagentechnik können bessere Leistungszahlen erreicht werden. So ergeben sich durch Maßnahmen wie den Einsatz eines innerer Wärmeübertragers für einige Kältemittel, z.B. R600a (Isobutan), große Potenziale zur Effizienzsteigerung.

Abbildung 41: Kreisprozess mit einstufiger Verdichtung zur Berechnung der Prozesseffizienz

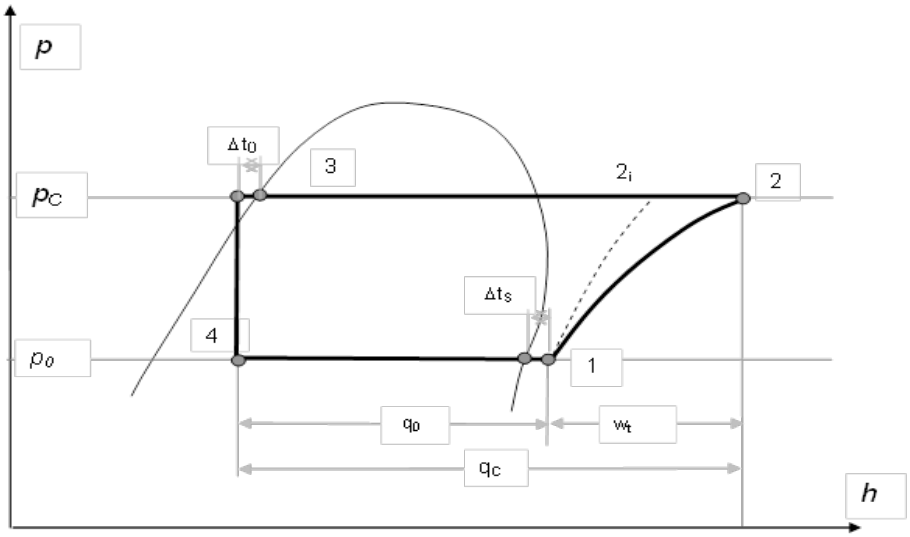


Abbildung 42 stellt die erreichten Leistungszahlen für unterschiedliche Verdampfungstemperaturen eines einstufigen Kreisprozess mit einer Kondensationstemperatur von 30 °C und einem isentropen Verdichtungswirkungsgrad von 70% dar. Die Flüssigkeitsunterkühlung $\Delta t_{ü}$ wurde mit 0 K angenommen, die Überhitzung $\Delta t_{ü}$ mit 1 K. Eine solche Überhitzung ist typisch für eine Kälteanlage mit überflutetem Verdampfer. In Abbildung 43 werden die Leistungszahlen in Relation zu den Werten des HFKW-Kältemittels R134a gesetzt.

Für subkritische Kreisprozesse (Betrieb unterhalb der kritischen Temperatur, siehe Abbildung 38, linke Ordinatenachse), wie sie bei der überwiegenden Anzahl der Kältemittel vorliegen, ist die Sättigungstemperatur an den Sättigungsdruck gebunden. Für transkritische Kreisprozesse, welche für die Kältemittel R744 (Kohlendioxid) sowie R1150 (Ethen) aufgrund der niedrigen kritischen Temperaturen der Kältemittel bei Umgebungsbedingungen in Deutschland vorliegen, ist der Druck nicht mehr abhängig von der Temperatur. In diesem Fall stellt der Hochdruck einen zusätzlichen frei wählbaren Parameter dar, welcher durch die Regelung gewählt werden muss. Aufgrund der Prozesscharakteristik sind von dem einfachen in Abbildung 41 beschriebenen Kreisprozess abweichende Kreislaufschaltungen die Regel, nicht die Ausnahme. Hierzu zählen z.B. sogenannte Booster-Schaltungen oder Varianten mit Rückgewinnung oder prozessinterner Nutzung der Entspannungsleistung. In Abhängigkeit der Wahl einer Vielzahl zusätzlicher Parameter spannt sich ein weiter Ergebnisraum auf. Ein Vergleich mit den Leistungszahlen subkritischer Prozesse ist nicht mehr sinnvoll durchführbar. In den folgenden Abbildungen wird daher von der Darstellung der Leistungszahlen transkritischer Prozesse abgesehen.

Abbildung 42: Leistungszahlen für einstufige Prozesse unterschiedlicher Kältemittel

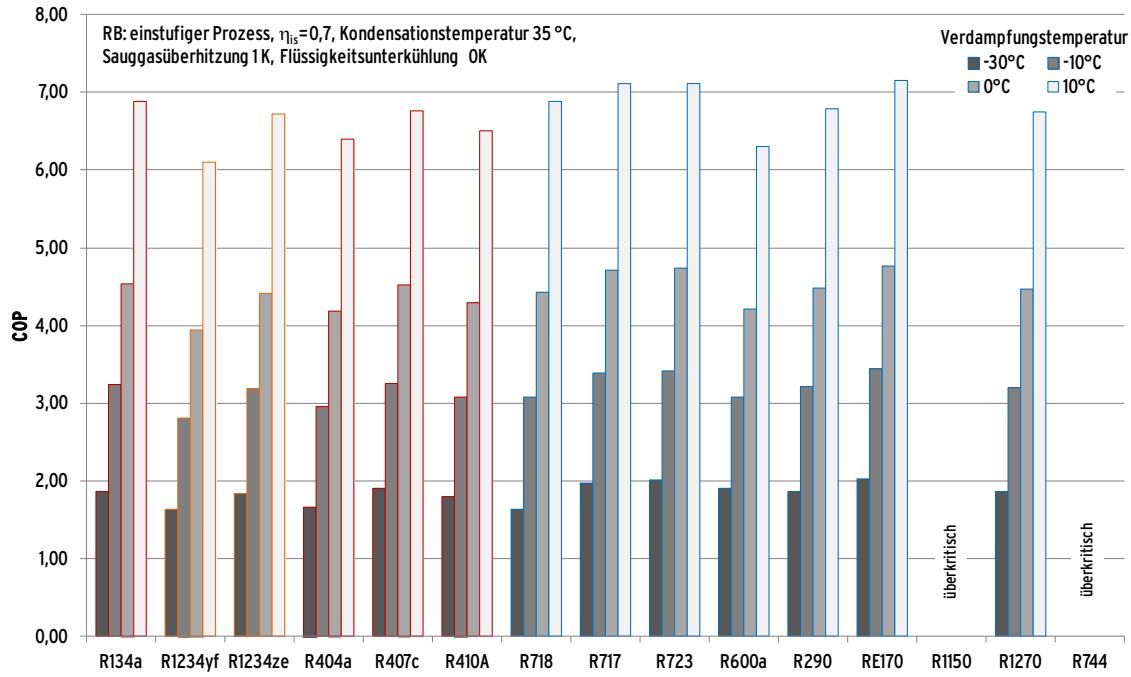
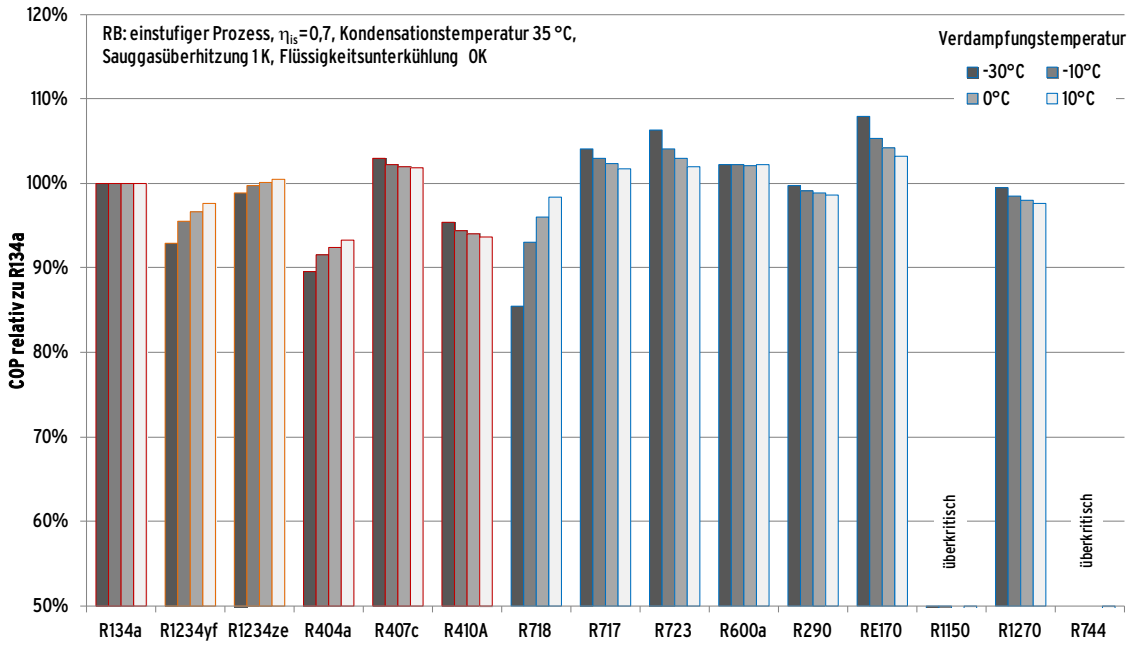


Abbildung 43: Relative Leistungszahlen einstufiger Prozesse unterschiedlicher Kältemittel im Vergleich zu R134a

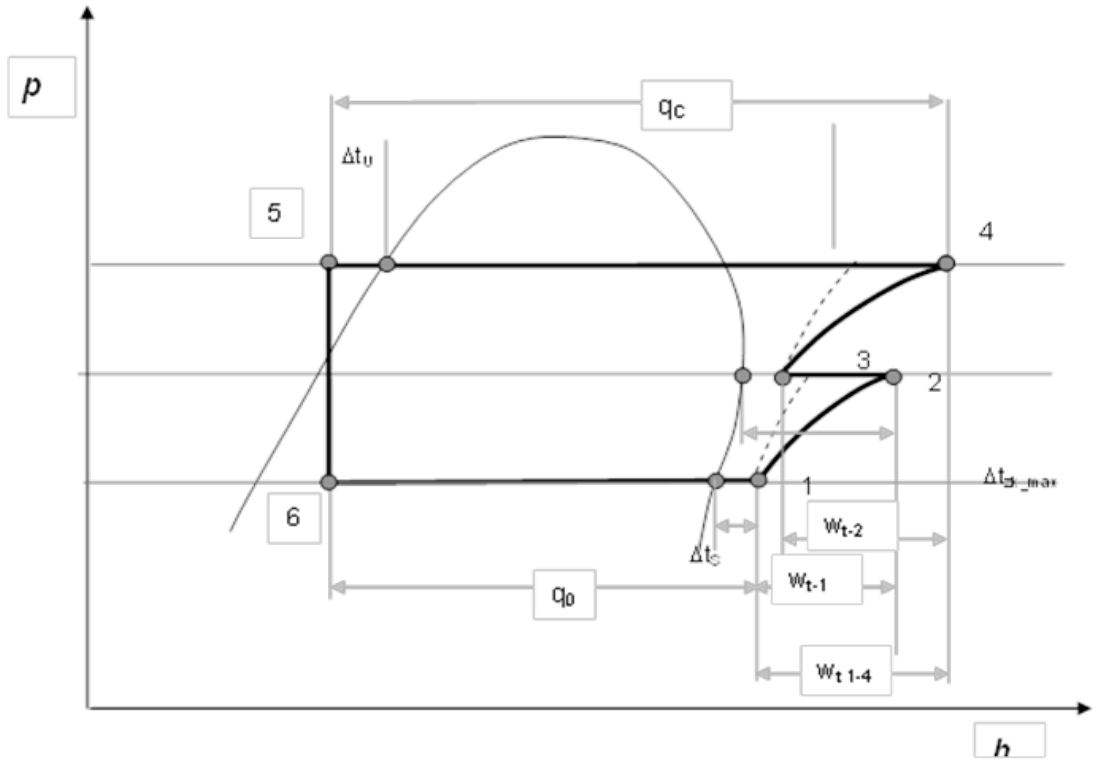


Die Abbildung 42 und 43 zeigen deutlich, dass eine Verwendung der gesättigten und ungesättigten HFKW anstatt natürlicher Kältemittel nicht durch deren Effizienz motiviert ist. Bereits im einfachen einstufigen Prozess überragen eine Vielzahl von natürlichen Kältemitteln die gebräuchlichen Kältemittel R134a, R404A und R410A. Diese Effekt wird für einige natürlicher Kältemittel, z.B. R600a oder R290, durch Anwendung eines inneren Wärmeübertragers noch verstärkt. Insbesondere das als Alternative für R134a in mobilen Klimaanlagen gehandelte R1234yf erzielt im Vergleich zu natürlichen Kältemitteln deutlich schlechtere Leistungszahlen.

RE170 (Dimethylether) ist bisher nur als azeotrope Gemischkomponente im Kältemittel R723 enthalten. Die offizielle Listung als Kältemittel durch die ASHRAE[7] erfolgte bisher aufgrund einer unvollständigen toxikologischer Bewertung nicht (Germanus 2011). Dennoch werden mit RE170 die höchsten Leistungszahlen im einstufigen Prozess erreicht. Diese positiven, rein rechnerischen Ergebnisse werden auch in anderen aktuellen Publikationen benannt (Baskaran & Mathews 2012; Cox et al. 2009). Die Umstände, warum es bisher nicht in Reinform als Kältemittel verwendet wurde, werden in den Veröffentlichungen nicht genannt. Die hohe Explosivität und Materialunverträglichkeit (nur wenige Dichtungswerkstoffe kommen hierdurch in Frage) könnten Ursachen hierfür sein.

Mit steigendem Druckverhältnis und für Kältemitteln mit einem flachen Verlauf der Isentropen (hohe Verdichtungsendtemperaturen) ist eine zweistufige Kreislaufgestaltung mit Zwischenkühlung, wie in Abbildung 44 dargestellt, sinnvoll. Die daraus resultierenden Leistungszahlen sind in Abbildung 45 dargestellt. Abbildung 46 zeigt den Vergleich mit einem einstufigen Prozess mit dem Kältemittel R134a.

Abbildung 44: Zweistufiger Verdichtungsprozess mit Zwischenkühlung



Vergleicht man die erreichbaren Leistungszahlen zweistufiger Prozesse werden deutliche Vorteile für die Kältemittel R718 (Wasser), R717 (Ammoniak), R723 (Ammoniak + Dimethylether) sowie RE170 (Dimethylether) gegenüber allen HFKW-Kältemitteln ersichtlich. Die Leistungszahl dieser Kältemittel übersteigt die der besten HFKW (R134a und R407C) im Schnitt um 10 %.

[7] ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. stellt das amerikanische Pendant zum IIR dar. ASHRAE führt die offizielle Listung der zugelassen Kältemittel durch.

Abbildung 45: Leistungszahlen für zweistufigen Prozess mit Zwischenkühlung für unterschiedliche Kältemittel

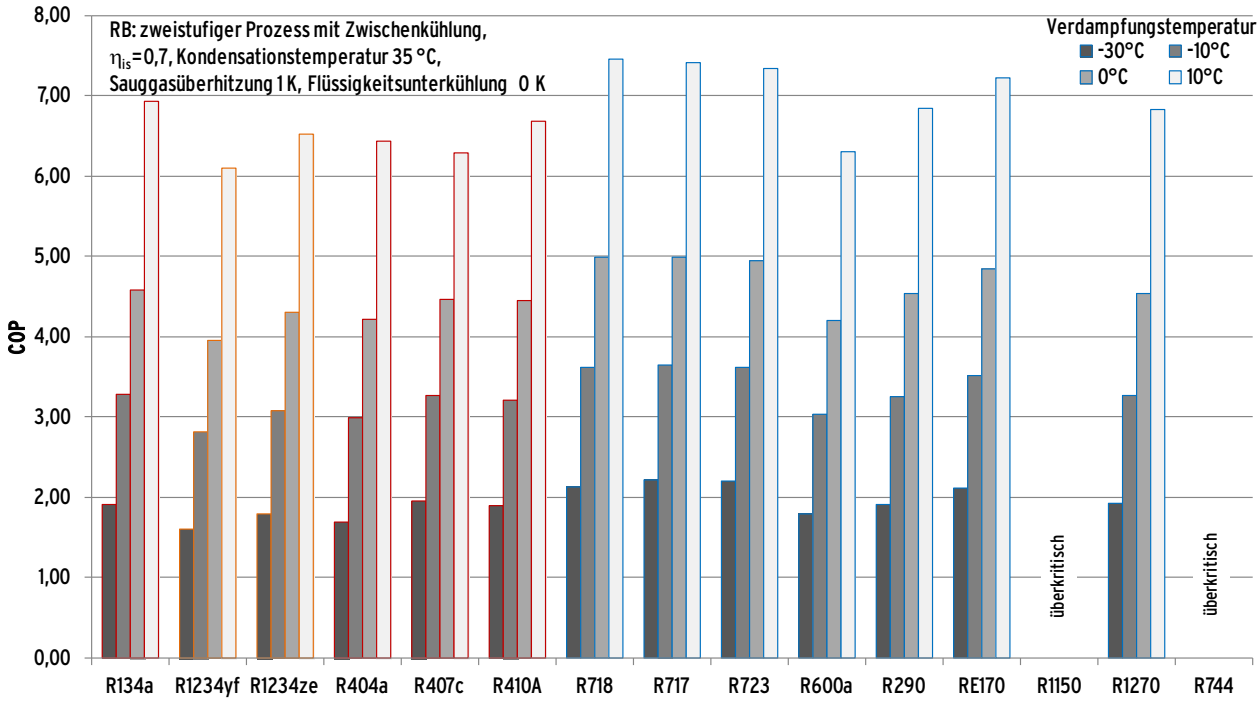
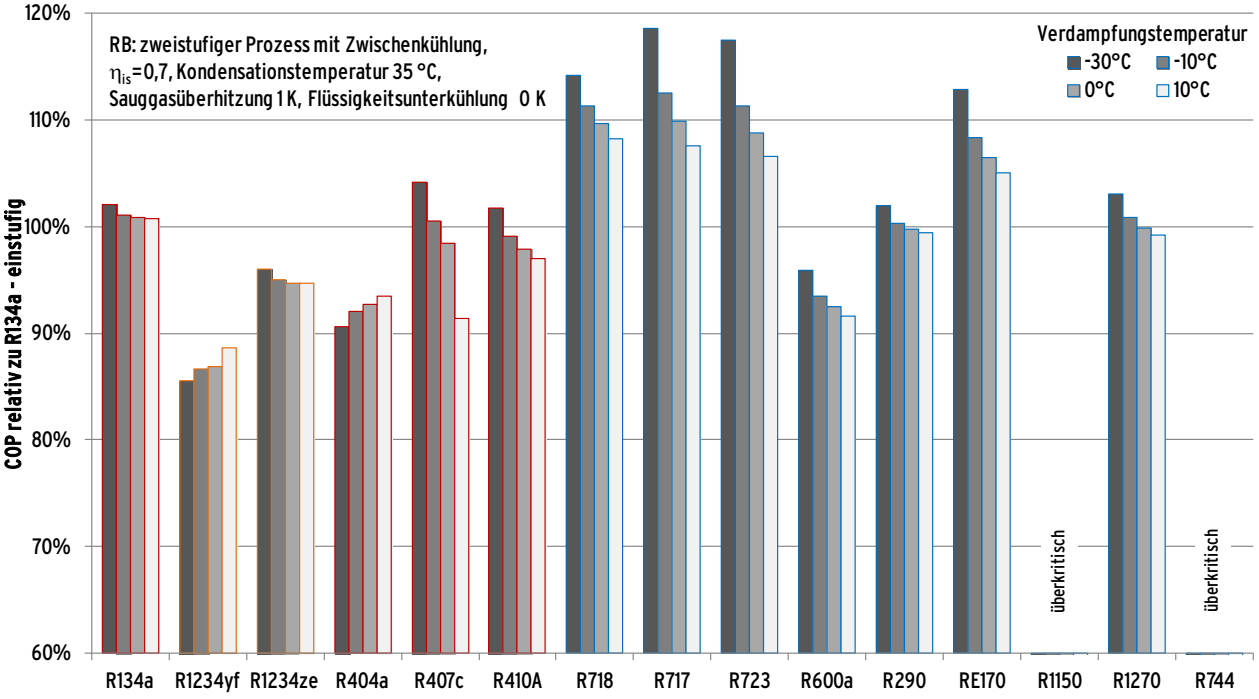


Abbildung 46: Relative Leistungszahlen zweistufiger Prozesse mit Zwischenkühlung im Vergleich zu einem einstufigen Prozess mit R134a



6.2.2 Kompressionskälteanlagen – Verdichter für natürliche Kältemittel

Verdichter stellen maschinentechnisch die Kernkomponente einer Kompressionskälteanlage dar. Für den Bau von Kälteanlagen mit natürlichen Kältemitteln ist die Verfügbarkeit von für das Kältemittel zugelassener Verdichter oft der limitierende Faktor.

Im Rahmen dieser Studie wurden marktverfügbare Verdichter zur Anwendung mit natürlichen Kältemitteln recherchiert. Die Recherche ergab ca. 370 Verdichter aus 30 Modellreihen von neun verschiedenen Herstellern. Die folgenden Darstellungen liefern einen Überblick über verfügbare Verdichterbaureihen und deren Kälteleistungsbereiche für die Kältemittel R744 (CO_2), R717 (Ammoniak) sowie R290 und R1270.

Abbildung 47: Kälteleistungsbereich verfügbarer Verdichter für das Kältemittel R744 (CO2) (ohne Anspruch auf Vollständigkeit)

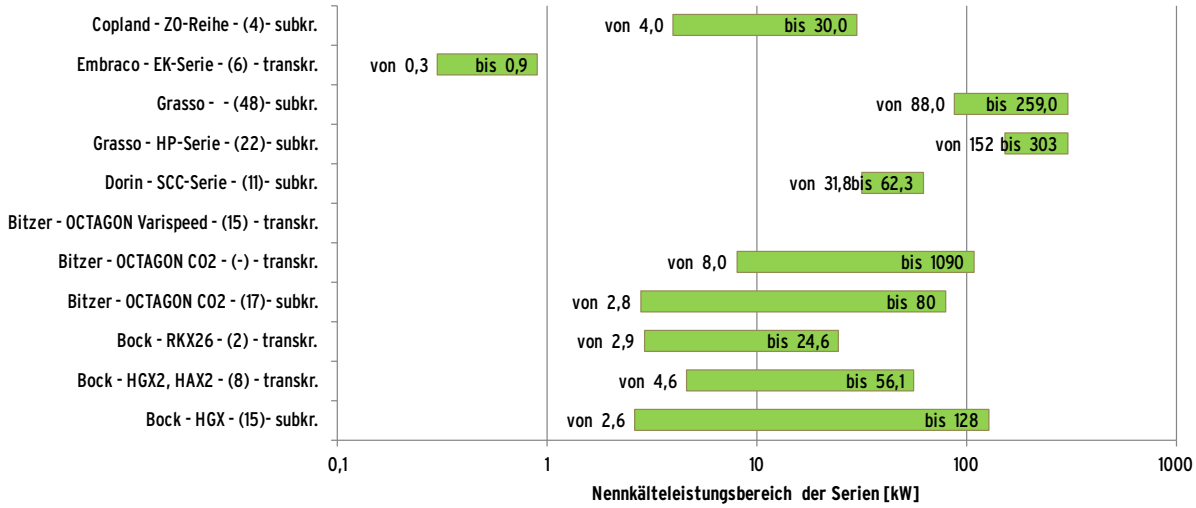


Abbildung 48: Kälteleistungsbereich verfügbarer Verdichter für das Kältemittel R717 (NH3) (ohne Anspruch auf Vollständigkeit)

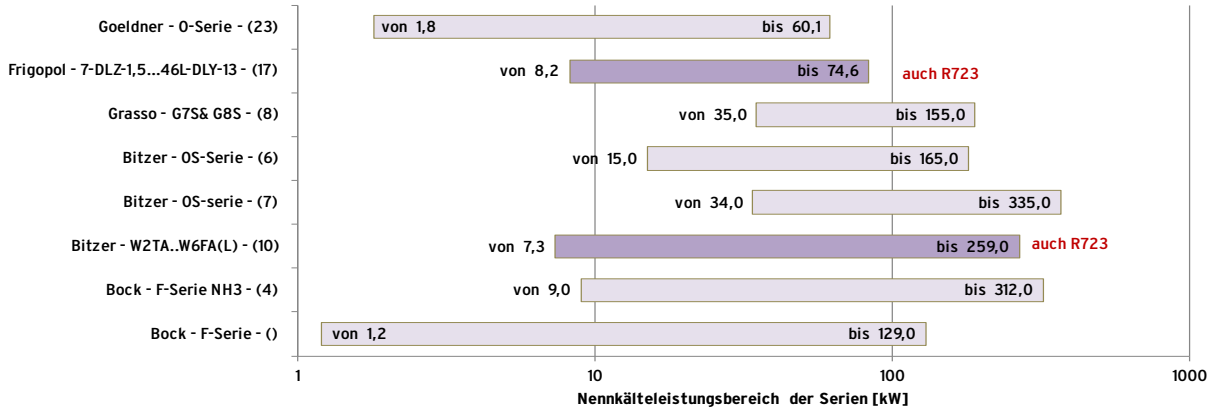
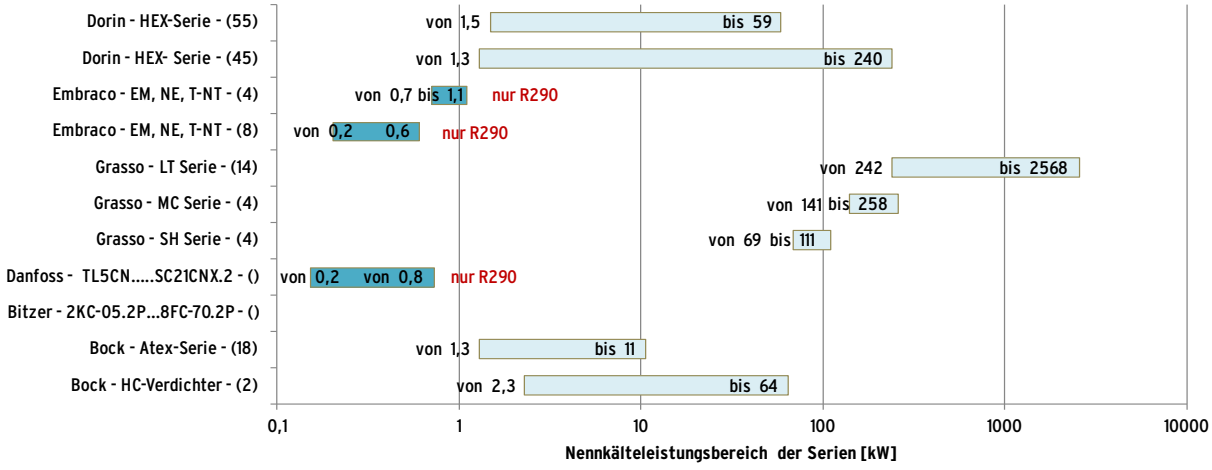


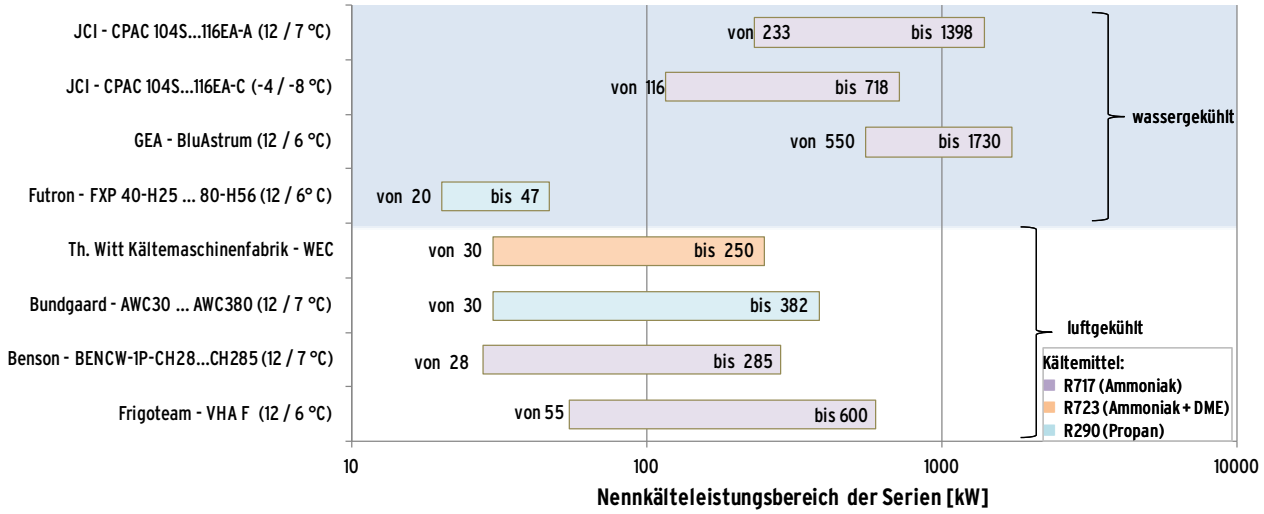
Abbildung 49: Kälteleistungsbereich verfügbarer Verdichter für reine Kohlenwasserstoffe - R290 (Propan) und R1270 (Propen) (ohne Anspruch auf Vollständigkeit)



6.2.3 Kompressionskälteanlagen – Kaltwassersätze

Verglichen mit der großen Anzahl verfügbarer Verdichter für Anlagen mit natürlichen Kältemitteln und einen weiten Kälteleistungsbereich ist die Anzahl verfügbarer Kaltwassersätze überschaubar. Als Kältemittel kommen für diesen Anlagentyp nur R717 (Ammoniak), R290 (Propan) sowie das Kältemittelgemisch R723 zur Anwendung. Aus Abbildung 50 wird erkennbar, dass Ammoniak-Anlagen überwiegend für den größeren Leistungsbereich angeboten werden. Zu beachten ist jedoch, dass es sich bei den recherchierten Anlagen um Serienprodukte handelt. Demgegenüber werden viele Anlagen zur Kälteversorgung in der Industrie speziell für den jeweiligen Anwendungsfall geplant und gebaut, für die auch weitere Kältemittel wie z.B. R744 für die Tiefkühlung in der Lebensmittelindustrie eingesetzt werden. Dies wird anhand Tabelle 10 (S. 69) deutlich, welche Beispielanlagen mit natürlichen Kältemitteln aufgelistet.

Abbildung 50: Kälteleistungsbereich verfügbarer Kaltwassersätze mit natürlichen Kältemittel (ohne Anspruch auf Vollständigkeit)



Neben Kaltwassersätzen sind weitere Kompressionskälteanlagen mit natürlichen Kältemitteln serienmäßig verfügbar. Diese umfassen:

- Multi-Split-Klimageräte mit CO_2 (R744): Von Daikin wurde 2008 eine Multi-Split-Klimaanlage mit CO_2 als Kältemittel vorgestellt. Die Leistungszahlen der Anlage bleiben jedoch hinter Standardgeräten mit R410A zurück. Aktuell sind Produktspezifikationen für 7 Seriengeräte (FXSN20AV bis FXSN100AV1) mit nominalen Kühlleistungen von 2,2 bis 11,2 kW erhältlich. Weitere Hersteller von Multi-Split-Geräten mit R744 sind nicht bekannt.
- Mono-Split-Klimagerät mit Propan: Erste Serienprodukte mit dem Kältemittel Propan (R290) werden durch die Firma *Godrej* (Indien) verkauft (hydrocarbons21.com 2012b). Diese umfassen nominale Kälteleistungen von 3,4 und 4,9 kW. Weitere Split-Geräte mit R290 wurden vom chinesischen Hersteller *Gree Electric Appliance* zur Serienreife gebracht (hydrocarbons21.com 2012a), allerdings wurde mit der Fertigung bis zum heutigen Zeitpunkt (Stand Juni 2013) noch nicht begonnen. Das Produkt besitzt eine nominale Kälteleistung von 2,6 kW und ist VDE-zertifiziert.

6.2.4 Ausgeführte Kälteanlagen mit natürlichen Kältemitteln

Wie bereits in Abschnitt 6.2.2 auf Seite 93 angedeutet, sind viele Kälteanlagen im Bereich der Industriekälte für den jeweiligen Anwendungsfall individuell geplant und gebaut. Die folgenden Tabelle 11 enthält eine Übersicht von Referenzanlagen mit natürlichen Kältemitteln. Sie enthält Angaben zu Standort, Zeitpunkt der Inbetriebnahme, Kältemittelart und -füllmenge, Einsatzgebiet sowie installierter Kälteleistung. Als Datengrundlage dienten Artikel in den Fachzeitschriften KI Kälte – Luft – Klimatechnik, KKA Kälte Klima Aktuell, KK Die Kälte & Klimatechnik und dem CCI Branchenticker sowie die Website www.eurammon.com.

Tabelle 11: Beispiele ausgeführter Kälteanlagen mit natürlichen Kältemitteln (Angaben ohne Gewähr)

Name	Inbetriebnahme	Kältemittel								Einsatzgebiet				Nennkälteleistung [kW]
		R290	R601	R717	R718	R723	R744	R1270	Füllmenge [kg]	Industriekälte	Nahrungsmittel-herstellung	Gebäude-klimatisierung	sonstiges	
Klimatisierung bei Greenpeace	1998		x						6		x			30
Versandschlächterei Neumarkt/Obpf.	1998			x					480		x			400
Stadtwerke Gera	1998								-				x	5.000
SB-Warenhäuser	1998			x					400				x	276
Kälteanlage J. Bauer KG	1999			x					1.400		x			-
Eiswerk_Fischindustrie_Heiligenhafen	1999			x					-		x			295
Lebensmittellager Luxemburg	1999			x					-		x			400
Supermarkt-Verteilzentrum Brandenburg	1999			x					-		x			800
Obstbau-Versuchsgut Heuchlingen	1999			x					46		x			75
Landtag Nordrhein-Westfalen	1999			x					280			x		680
Fleischkombinat Kostelecke uzeniny a.s.	1999			x					-		x			1.800
Klimatisierung CargoLux	1999				x				-	x				400
Klimatisierung Uni Essen	1999				x				-			x		800
Berlin-Ostbahnhof	2000			x					-			x		1.250
Tiefkühllager für Backwaren	2000			x					56				x	180
Allgäuer Brauhaus	2000			x					700		x			680
Hermannsdorfer Landwerkstätten Hannover	2000			x					130		x			360
Nestle Tiefkühllager Beauvais/F	2000			x			x		6.000/ 1.300		x			1.200
Danone Ochsenfurt	2001			x					1.000		x			2.400
Frostung und Kühlung M+P Tiefkühlkost	2001			x			x		2.000		x			475
Nestle Product Technology Centre	2001			x					7			x		230
Kohlendioxidrückgewinnung bei Yara	2001			x					-		x			200
Sachsenmilch	2001			x					3.000		x			10.600

Name	Inbetriebnahme	Kältemittel								Einsatzgebiet				Nennkälteleistung [kW]
		R290	R601	R717	R718	R723	R744	R1270	Füllmenge [kg]	Industriekälte	Nahrungsmittelherstellung	Gebäude-klimatisierung	sonstiges	
Froster und Tiefkühllager Bielefeld	2001			x			x		1.200/ 150		X			475
M+P Tiefkühlkost Bielefeld	2001			x			x		1.200/ 150		X			600
Nestle Kaffeegefriertrocknung Hayes/GB	2001			x			x		-		X			2.400
Klimatisierung VW Manufaktur Dresden	2001				x				-	X				2.000
Berglandmilch	2002			x					9.000		X			3.500
Bürogebäude Frigopol	2002					x			30			X		60
Kühlung und Lagerung von Früchten	2002			x					1.800		X			460
Pizza Wagner	2002			x					3.000		X			1.070
Arianezentrum Ottobrunn	2002	x							34	X				1.200
KÜBA Wärmeübertrager-Testzentrum	2002			x					-			X		-
Alpincenter Bottrop	2002			x					-				X	1.400
Flughafen Stuttgart	2003			x					-			X		2.300
Fischverarbeitungszentrum Sassnitz	2003			x			x		21.000/ 12.000		X			5.150
Kunsteisbahn Ravensburg	2003			x			x		7.000/ 600				X	618
Brauerei Zipf / Österreich	2004			x					500		X			570
Pasta & Co	2004			x			x		435		X			325
Süßwarenhersteller	2004			x					1.800		X			4.300
Joguhrtverarbeitung	2004					x			18		X			230
Milchunion Hocheifel Pronsfeld	2004			x					12.000		X			3.660
U-Bahnhof Marienplatz, München	2004			x			x		-	X				550
Tiefkühllager Galliker Transport AG, Dagmersellen/CH	2004			x					-		X			1.200
Geflügelproduzent	2005			x					2.850		X			2.600
Fleischverarbeitung Edeka	2006			x					10.000		X			5.500
Snow Dome Bispingen	2006			x					1.200				X	2.280
CC GROWA, Bern	2006						x		400		X			140
Atlantic Pelagic Seafood, Kühlschiff	2006			x			x		10.000/ 1.500		X			6.500
Briefsortierzentrum Müllingen Schweiz	2007			x					880			X		4.300
Tiefkühllager Frigosuisse / Schweiz	2007			x					2.100		X			540
Aktiv-Hotel, Altis/Slowakei	2007					x			15				X	157
Lekkerland Stapefeld NK	2008			x					400		X			600
Lekkerland Stapefeld TK	2008			x			x		350		X			210
Lekkerland Oberhausen NK	2008			x					400		X			600

Name	Inbetriebnahme	Kältemittel								Einsatzgebiet				Nennkälteleistung [kW]
		R290	R601	R717	R718	R723	R744	R1270	Füllmenge [kg]	Industriekälte	Nahrungsmittel-herstellung	Gebäude-klimatisierung	sonstiges	
Lekkerland Oberhausen TK	2008			x			x		350		x			210
Lekkerland Allershausen NK	2008			x					400		x			600
Lekkerland Allershausen TK	2008			x			x		350		x			165
Gartner KG, Kehl	2008			x					365		x			853
Franken-Gut (EDEKA), Trunstadt	2008			x			x		-		x			1.160
Ozeaneum, Stralsund	2008			x					-			x		900
Südbayerische Fleischwaren GmbH, Obertraubling	2009					x			-		x			300
Kernspintomograph, Ärztezentrum Bad Reichenhall	2009					x			-					-
Danish Crown, Fleisch-Zerlegebetrieb, Boizenburg	2009			x					-		x			500
EDEKA Fleischwerk Rheinstetten	2010			x					-		x			9.000
Logistikzentrum Lekkerland, Großbeeren/Berlin	2010			x			x		400/ 550		x			650
Netto Dänemark	2010						x		-		x			1.430
Motorenprüfstand TH Zwickau	2011				x				-	x				50
Steweag-Steg Graz, Schaltwarte	-					x			-			x		-
Wolf-ButterBack, Fürth	-						x		-		x			1.000
Geflügelschlachterei Georg Stolle, Neutrebbin	-			x					250		x			1.750
Geflügelschlachterei Wiesenhof, Lohne, Zentrale A	-			x					-		x			1.400
Geflügelschlachterei Wiesenhof, Lohne, Zentrale B	-			x					-		x			1.860
Emmi Dagmersellen	-								-		x			0
Dachser Umschlaglager, Langenhagen/Hannover	-			x					600		x			1.080
Phillips Petroleum, Rohölverarbeitungsschiff	-	x							-	x				5.000

In den nachstehenden Abbildungen sind die Daten der Tabelle 11 nach den Kriterien Kältemittel und Anwendungsbereich ausgewertet. Etwa drei Viertel der installierten Kälteleistung basiert auf dem Kältemittel Ammoniak (Abbildung 51). Ca. 18% der installierten Kälteleistung geht auf Anlagen mit dem Kältemittel CO_2 zurück. Der Anteil von Anlagen mit den Kältemitteln Propan, Wasser, R723 und n-Pentan ist relativ gering.

Der Großteil der installierten Kälteleistung von Anlagen mit natürlichen Kältemitteln ist im Bereich der Nahrungsmittelherstellung zu finden (Abbildung 52). Eine weitere Aufteilung des Nahrungsmittelsektors ist in Abbildung 53 dargestellt.

Abbildung 51: Anteil der installierten Kälteleistungen nach verwendetem natürlichen Kältemittel (bezogen auf die in Tabelle 11 genannten Anlagen)

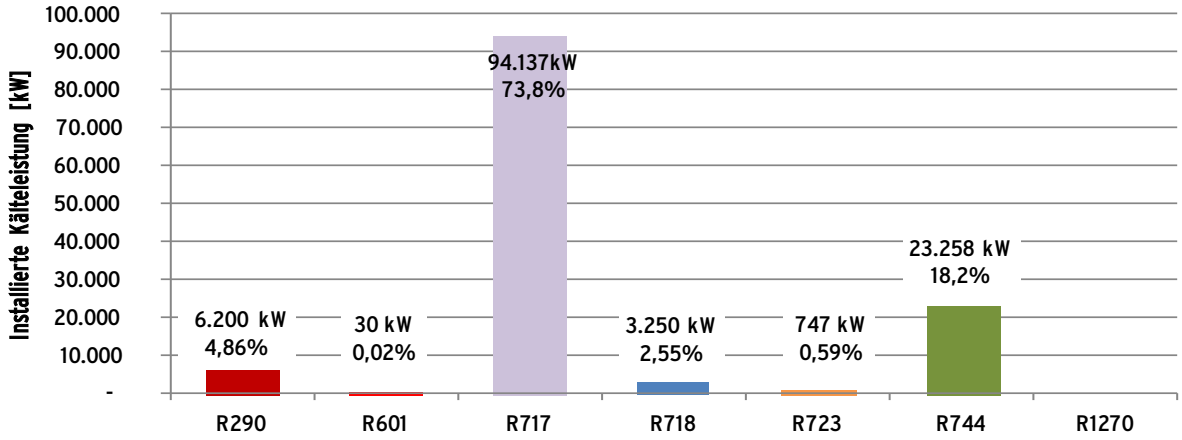


Abbildung 52: Anteil der installierten Kälteleistungen mit natürlichen Kältemitteln nach Anwendung (bezogen auf die in Tabelle 11 genannten Anlagen)

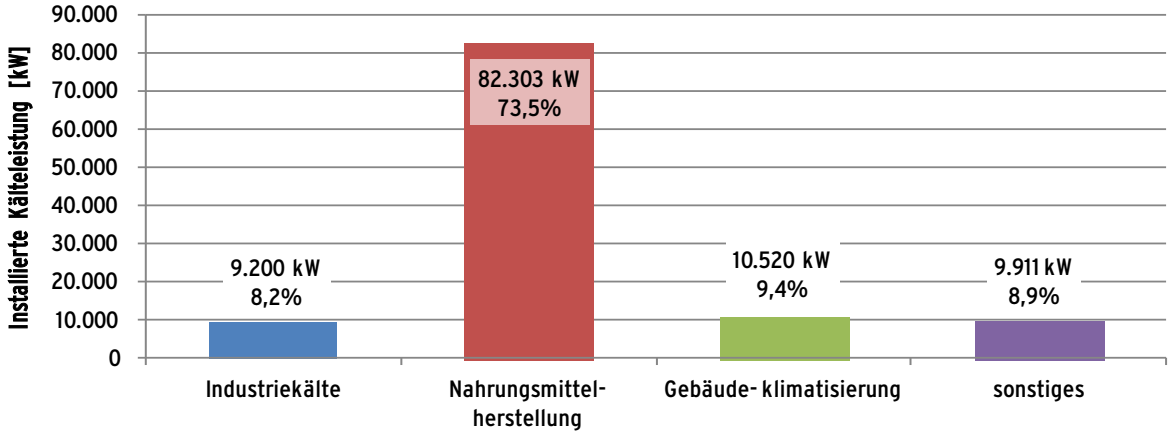
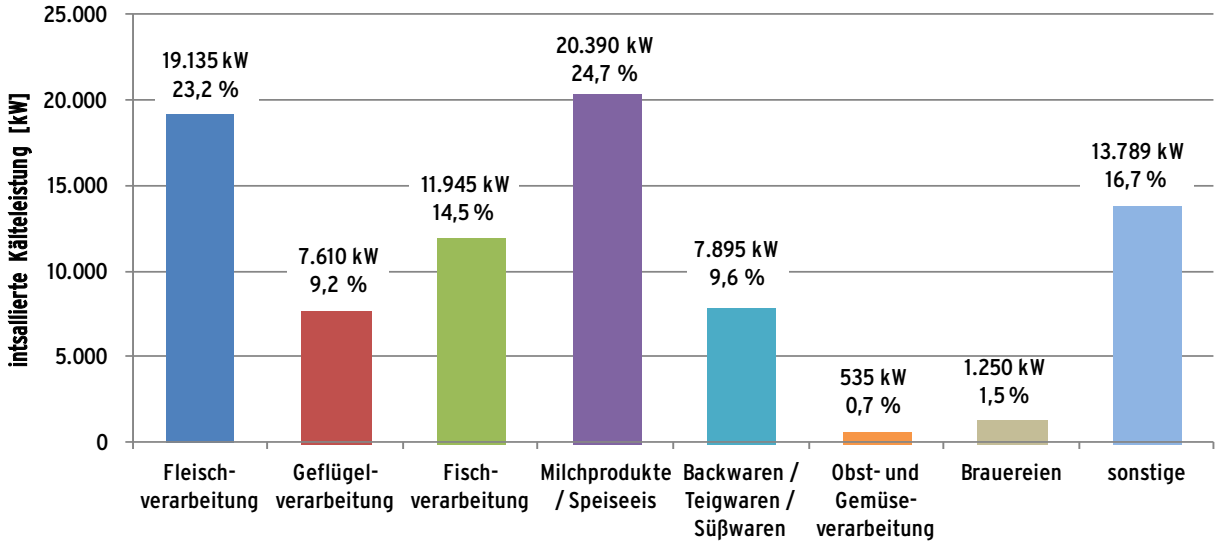


Abbildung 53: Anteil der installierten Kälteleistungen mit natürlichen Kältemitteln nach Anwendungen im Bereich der Nahrungsmittelherstellung Anwendung (bezogen auf die in Tabelle 11 genannten Anlagen)



6.3 Wärmegetriebener Kälteerzeugungssysteme (Ab- und Adsorptionskälteanlagen)

6.3.1 Geschlossene Verfahren

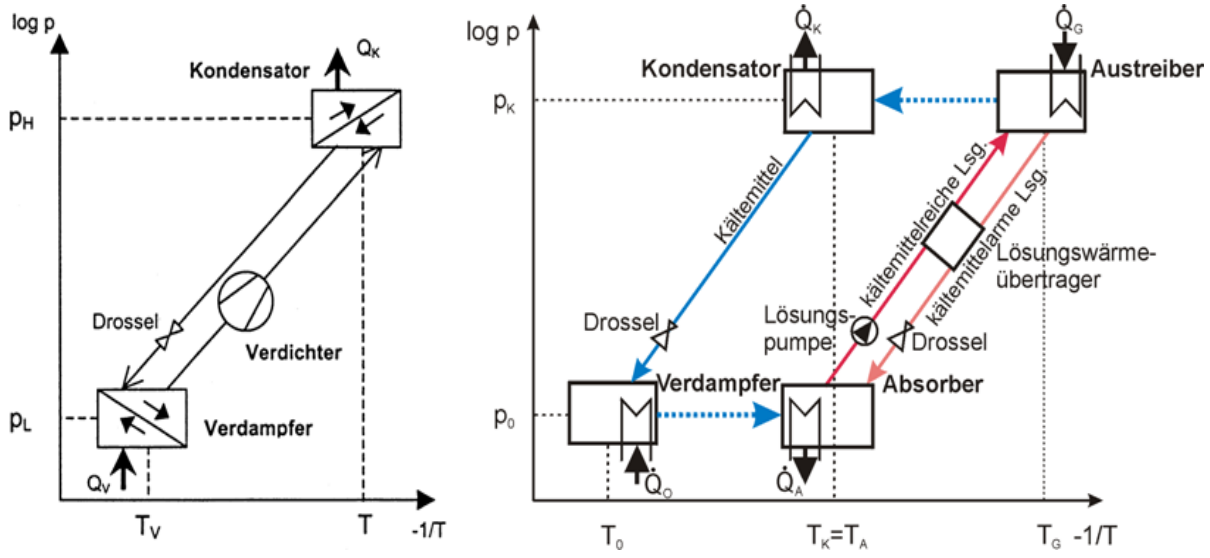
Bei geschlossenen Verfahren wird Kaltwasser für verschiedene Kühl- bzw. Klimatisierungsaufgaben bereitgestellt.

Eine Absorptionskälteanlage nutzt die Aufnahmefähigkeit (Absorptionsvermögen) einer Flüssigkeit für gasförmiges Kältemittel aus dem Verdampfer. Die Druckerhöhung auf den Kondensationsdruck erfolgt mittels Lösemittelpumpe in der flüssigen Phase, in der das Kältemittel gelöst (absorbiert) ist. Bei Kondensationsdruck wird das Kältemittel durch Wärmezufuhr aus der Lösung ausgetrieben und anschließend kondensiert.

Bei den sorptiven Verfahren ist zwischen kontinuierlich arbeitenden Systemen (Absorption des Kältemitteldampfes in einer Salzlösung) und zyklisch arbeitenden Systemen (Adsorption des Kältemitteldampfes an einen Feststoff) zu unterscheiden.

Der Absorptionsprozess erreichte bereits im 19. Jahrhundert großtechnische Bedeutung, bevor durch die Fortschritte im Maschinenbau der mechanische Verdichter die Kältetechnik dominierte. Aus der schematischen Gegenüberstellung des mit mechanischem Verdichter arbeitenden Kaltdampfprozesses (Abbildung 54, linke Seite) und des Absorptionsprozesses (Abbildung 54, rechte Seite) ist das gemeinsame Grundprinzip erkennbar. Der Lösungskreislauf der sorptiven Verfahren wird deshalb auch als „thermischer Verdichter“ bezeichnet.

Abbildung 54: Prozessschaltbild im log p-(1/T)-Diagramm einer Kompressionskälteanlage (links) und einer Absorptionskälteanlage (rechts)



Im Bereich der wärmegetriebenen Kälteerzeugungsverfahren, zu denen auch die Adsorptionskältetechnik gehört, stehen verschiedene Anlagenvarianten mit verschiedenen Stoffpaaren zur Auswahl, welche jeweils eine eigene Charakteristik aufweisen.

6.3.1.1 Arbeitsstoffpaare

Adsorptionskältemaschinen

Für Adsorptionskälteanlagen bieten sich Wasser, Methanol und Ammoniak als Kältemittel sowie Aktivkohle, Zeolith und Silikagel als Sorbentien an (Fan et al. 2007). In marktverfügbaren Anlagen finden überwiegend die Arbeitsstoffpaare Wasser/Zeolith bzw. Wasser/Silikagel.

Die Verwendung von Wasser als Kältemittel begrenzt die möglichen Kaltwasseraustrittstemperaturen durch die notwendigen Verdampfungstemperaturen > 0 °C auf etwa 4 °C. Der Einsatz von Methanol bzw. Ammoniak als Kältemittel lässt Verdampfungstemperaturen < 0 °C zu. Eine Kristallisationsgefahr, wie bei Absorptionskältemaschinen mit Salzlösungen, liegt nicht vor. Durch die Verwendung von Wasser als Kältemittel muss der gesamte Prozess im Vakuum ablaufen. Dies macht eine hohe Dichtheit sowie große Strömungsquerschnitte bei der Anlagengestaltung erforderlich

Für die Arbeitsstoffpaare Wasser/Silikagel bzw. Wasser/Zeolith werden Antriebstemperaturen zwischen 60 und 90°C benötigt. Die erreichbaren Wärmeverhältnisse liegen zwischen 0,4 und 0,7 (Henning 2004).

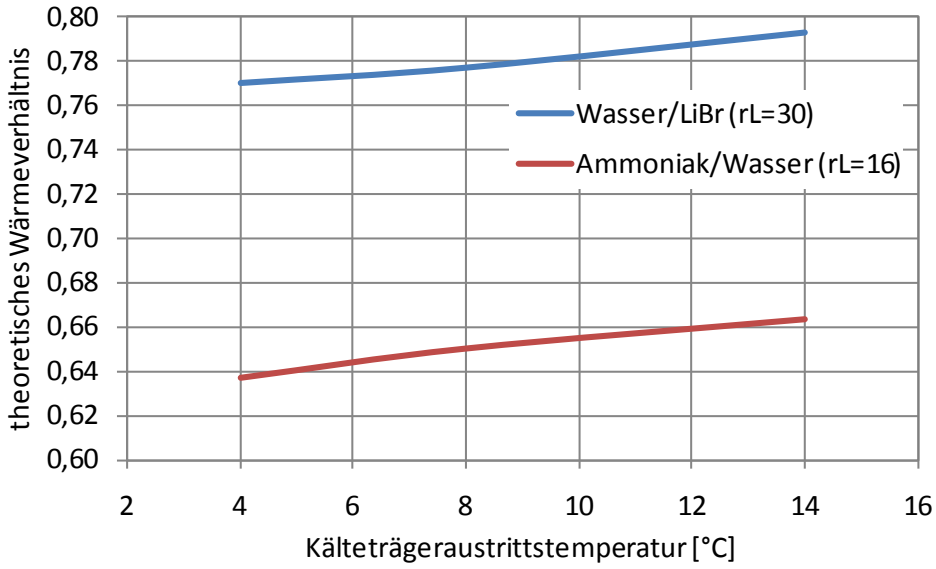
Absorptionskältemaschinen

Bei Absorptionskälteanlagen sind die Arbeitsstoffpaare Wasser/Lithiumbromid (LiBr) sowie Ammoniak/Wasser üblich. Neben diesen Arbeitsstoffpaaren wurde in Versuchsanlagen auch Wasser/Lithiumchlorid eingesetzt.

Beim Einsatz des Arbeitsstoffpaares Wasser/LiBR sind durch den Tripelpunkt des Kältemittels Wasser und das Lösungsfeld des Wasser/LiBr-Gemisches bestimmte technische Grenzen zu berücksichtigen. Durch den Tripelpunkt des Kältemittels Wasser wird anlog zu den Adsorptionskältemaschinen die Verdampfungstemperatur auf Werte > 0 °C begrenzt. Mittels Resorptionsprozess, bei welchem auch im Verdampfer eine Salzlösung zirkuliert, sind auch Verdampfungstemperaturen unter 0 °C möglich (Richter 2008). Die Temperaturspreizung zwischen Kaltwasser, Kühlwasser und Heizwasser wird durch das Lösungsfeld begrenzt. Beim Überschreiten der Löslichkeitsgrenze besteht Kristallisationsgefahr. Die erreichbaren Wärmeverhältnisse einstufiger Prozess liegen bei etwa 0,6 bis 0,8 und sind von den Kalt-, Kühl- und Heizwassertemperaturen und dem gewählten Lösungsumlauf abhängig (vgl. Abbildung 55, blaue Linie). Analog zu den Adsorptionskältemaschinen mit Wasser als Kältemittel ergeben sich auch für dieses Arbeitsstoffpaar die entsprechenden Forderungen hinsichtlich Dichtheit und ausreichend großer Strömungsquerschnitte aufgrund des Anlagenbetriebs im Vakuum.

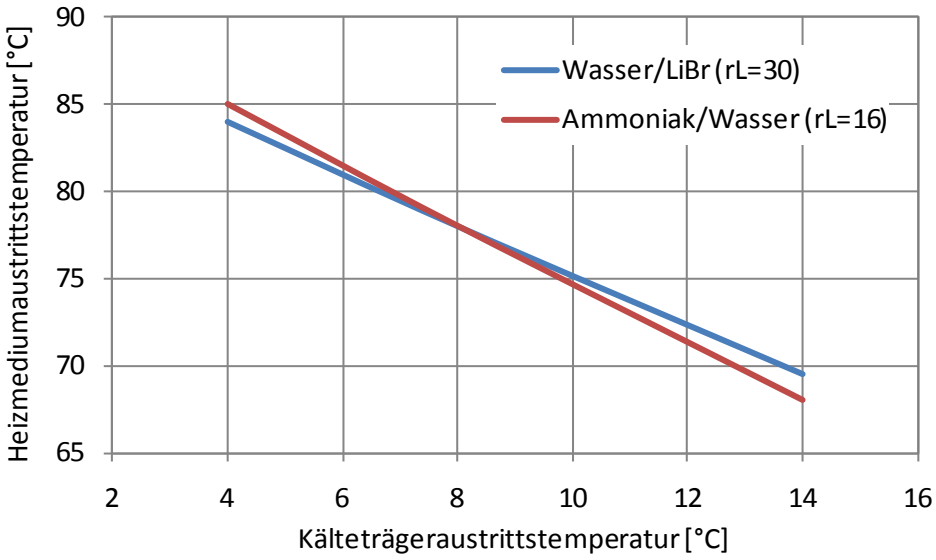
Mit dem Arbeitsstoffpaar Ammoniak/Wasser sind Kälteträgertemperaturen weit unter dem Gefrierpunkt von Wasser möglich, da hier Ammoniak als Kältemittel verwendet wird. Eine Kristallisationsgefahr besteht nicht. Durch die deutlich höheren Drücke ist eine kompaktere Bauweise gegenüber Wasser/LiBr-Anlagen möglich. Nachteilig ist die nach der Austreibung notwendige Trennung von Kälte- und Lösungsmittel (Rektifikation). Dieser Schritt ist notwendig, um den Eintritt von Wasser in den Kondensator und anschließend den Verdampfer zu verhindern. Die erreichbaren Wärmeverhältnisse sind gegenüber dem Arbeitsstoffpaar Wasser/Lithiumbromid mit 0,5 bis 0,7 geringfügig kleiner (vgl. Abbildung 55, rote Linie).

Abbildung 55: Erreichbare Wärmeverhältnisse in Abhängigkeit der Kälteträgeraustrittstemperatur und des Arbeitsstoffpaares



Randbedingungen: Kühlwassereintrittstemperatur: 29 °C, relativer Lösungsumlauf (f_L) = 30 für Wasser/LiBr bzw. 16 für Ammoniak/Wasser, herkömmliche Temperaturdifferenzen der externen Medien, Absorptionswirkungsgrad = 0,4

Abbildung 56: Zusammenhang zwischen Heizmedien- und Kälteträgertemperatur



Randbedingungen: Kühlwassereintrittstemperatur: 29 °C, relativer Lösungsumlauf (f_L) = 30 für Wasser/LiBr bzw. 16 für Ammoniak/Wasser, herkömmliche Temperaturdifferenzen der externen Medien, Absorptionswirkungsgrad = 0,4

Relativ neu ist der Einsatz der sogenannten *Ionic Liquids* (ionischen Flüssigkeiten). Bei ionischen Flüssigkeiten kommen große, komplexe Ionen und Kationen zur Anwendung. Durch die Vielzahl der möglichen Kombinationen ist die Auswahl an ionischen Flüssigkeiten sehr groß (Merck 2005). Erste Untersuchungen an einer Absorptionskältemaschine mit dem Stoffpaar Wasser und 1-Ethyl-3-Methylimidazolium-Ethylsulfat zeigten vielversprechende Ergebnisse, welche bisher aber noch hinter denen des Stoffpaares Wasser/LiBr zurückbleiben. Gründe sind hierbei der notwendige Anpassungsbedarf durch teilweise sehr unterschiedliche Stoffeigenschaften, wie z.B. die viel höhere Viskosität und Oberflächenspannung (Radspieler & Christian Schweigler 2010).

6.3.1.2 Schaltungsvarianten von Absorptionskälteanlagen

Neben einem *Single-Effect–Single-Lift*-Absorptionsprozess, wie er in Abbildung 54, Seite 100 dargestellt ist, lassen sich mehrstufige Absorptionsprozesse realisieren (Abbildung 57). Hierdurch kann der Temperaturhub oder das Wärmeverhältnis gesteigert werden.

Abbildung 57: Schaltungsvarianten unterschiedlicher Kreisprozesse von Sorptionskälteanlagen

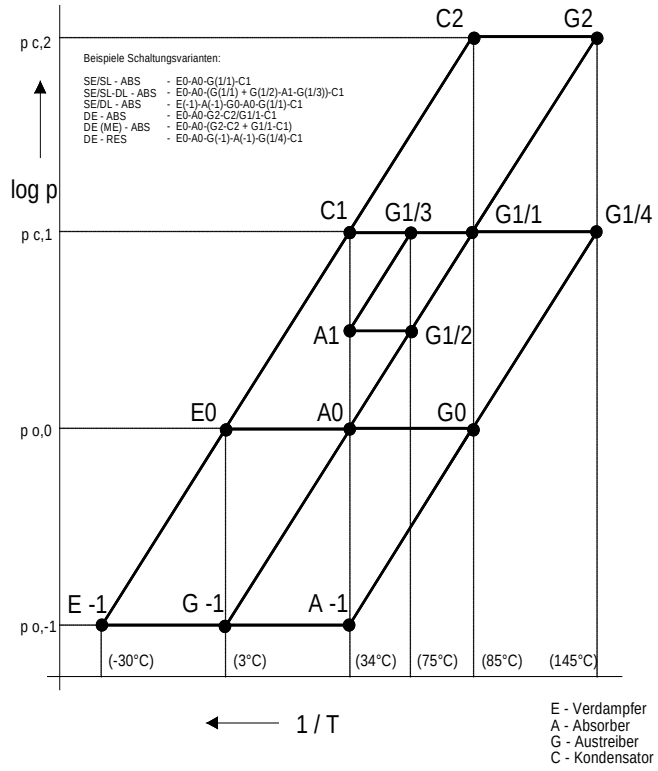
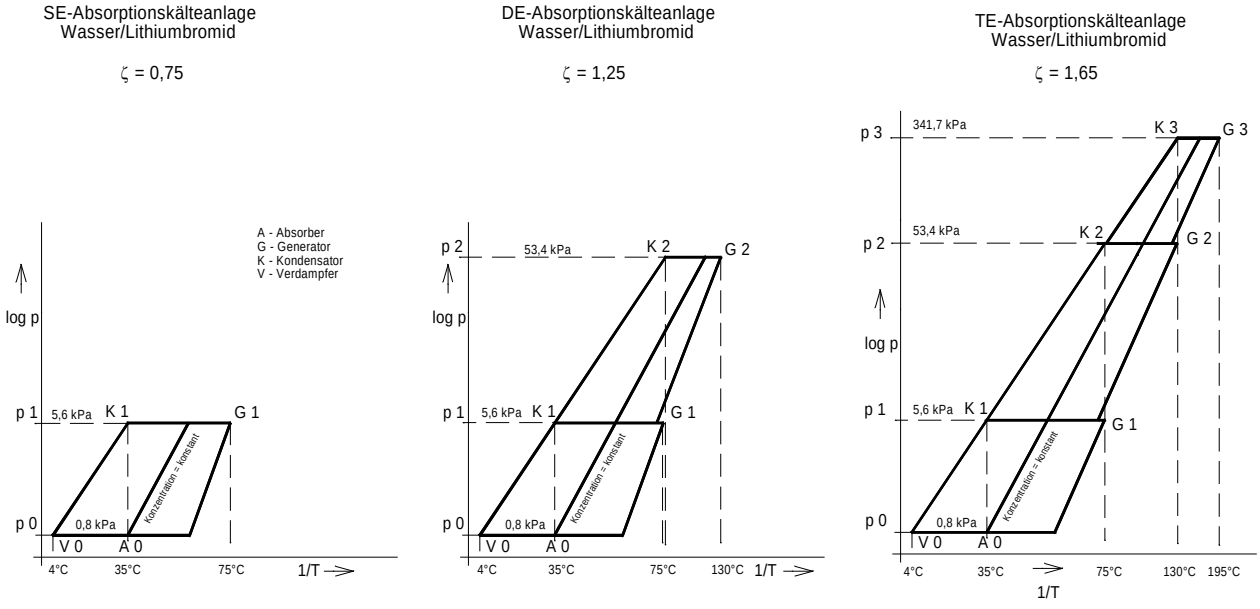


Abbildung 58: Darstellung von Effect-stufigen Absorptionskreisprozessvarianten im log p-(-1/T)-Diagramm



Man spricht von *Effect* (*single, double, triple*), wenn die zur Verfügung stehende Heizenergie mehrfach auf unterschiedlichen Temperaturniveaus verwendet wird. Hierdurch wird eine höhere Ausnutzung der Heizenergie erreicht, das Wärmeverhältnis steigt (Abbildung 58). Mit

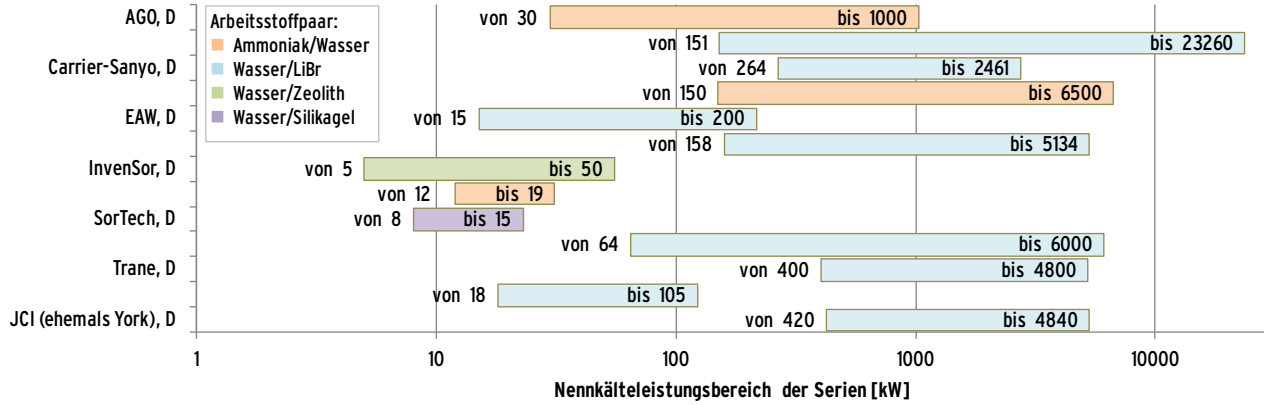
Lift-Schaltungen lässt sich der Temperaturhub steigern. Der Begriff Stufigkeit (z.B. zweistufig, mehrstufig), welcher bei Kompressionskälteanlagen für in Reihe geschaltete Verdichtungsprozesse steht, wird in der Absorptionstechnik als Überbegriff für *effect*- bzw. *lift*-Schaltungen verwendet. Die tatsächliche Gestaltung des Absorptionskälteprozesses kann aus dem Begriff der Stufigkeit nicht abgeleitet werden.

Abbildung 59: links - einstufige Wasser/Lithiumbromid-AKM der Firma EAW Westenfeld, Kälteleistung: 80 kW (EAW 2010)
rechts – einstufige Ammoniak/Wasser-AKM PinkChiller PC19 der Firma Pink GmbH, Österreich

6.3.1.3 Marktübersicht Ab- und Adsorptionskälteanlagen

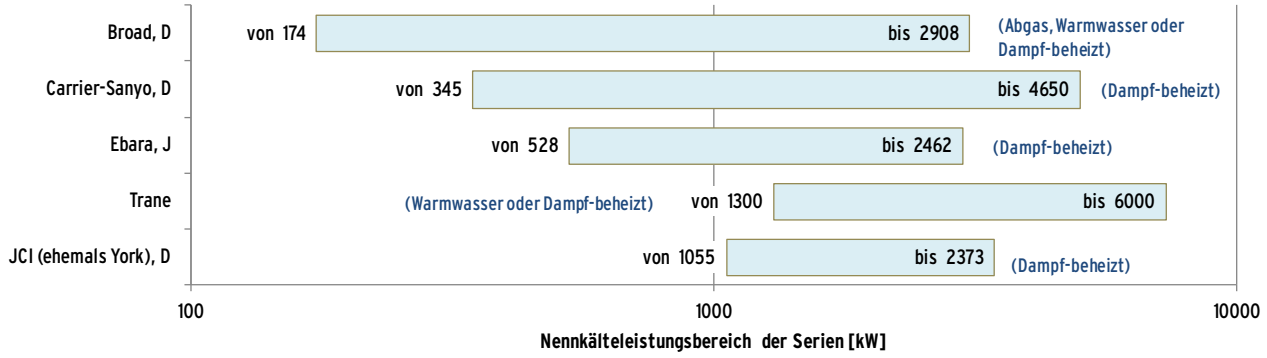
Die nachstehenden Abbildungen geben einen Überblick über den Leistungsbereich der am Markt verfügbaren Anlagen. Abbildung 60 beinhaltet einstufige Ab- und Adsorptionskälteanlagen. Deutlich wird, dass Adsorptionskälteanlagen vorwiegend im kleinen Leistungsbereich bis maximal 50 kW zu finden sind. Absorptionskälteanlagen gibt es heute in einem sehr breiten Leistungsbereich von etwa 15 kW bis zu über 20 MW Kälteleistung. Die überwiegende Anzahl von Anlagen stellen Absorptionskälteanlagen mit dem Stoffpaar Wasser/LiBr dar. Ammoniak/Wasser-Absorptionskälteanlagen sind dem gegenüber seltener am Markt verfügbar, decken aber einen ähnlichen Leistungsbedarf ab.

Abbildung 60: Kälteleistungsbereich verfügbarer einstufiger Ab- und Adsorptionskälteanlagen (ohne Anspruch auf Vollständigkeit)



Im Bereich zweistufiger Anlagen sind nur Wasser/LitBr-Absorptionskälteanlagen zu finden. Der in **Fehler! Ungültiger Eigenverweis auf Textmarke.** abgedeckte Leistungsbereich beginnt jedoch erst bei Leistungen von weit über 100 kW. Zweistufige Absorptionskälteanlagen kleiner Leistung sind derzeit nicht marktverfügbar.

Abbildung 61: Kälteleistungsbereich verfügbarer zweistufiger (double effect) Absorptionskälteanlagen (ohne Anspruch auf Vollständigkeit)



6.3.1.4 Anwendungsbeispiele für Absorptionskältemaschinen in Industrie und Gebäudeklimatisierung

Nachfolgend werden zwei Anwendungen von Absorptionskältemaschinen beschrieben. In Abbildung 62 ist ein erdgasbasiertes System zur Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung im kleinen Leistungsbereich dargestellt. Die KWKK-Anlage versorgt ein Gewerbegebäude in Tettnang mit Strom, Wärme für Heizung und Warmwasser sowie Klimakälte. Das erdgasbetriebene BHKW liefert eine elektrische Leistung von 30 kW und eine thermische Leistung von 65 kW. Das BHKW wird wärmegeführt betrieben, d.h. es arbeitet nur bei Wärmeabnahme. Die Wärme wird ganzjährig zur Brauchwarmwasser-Bereitung, im Winter zur Heizung und im Sommer zur Kühlung genutzt. Mit 65 kW Antriebswärmeleistung aus dem BHKW kann in der einstufigen Wasser/LiBr-AbKM eine Kälteleistung von 49 kW erzeugt werden (Wärmeverhältnis 0,75). Die effizientere Nutzung der hochtemperierten Abgaswärme in einem zweistufigen AKM-Teil ist in diesem Leistungsbereich bisher nicht wirtschaftlich.

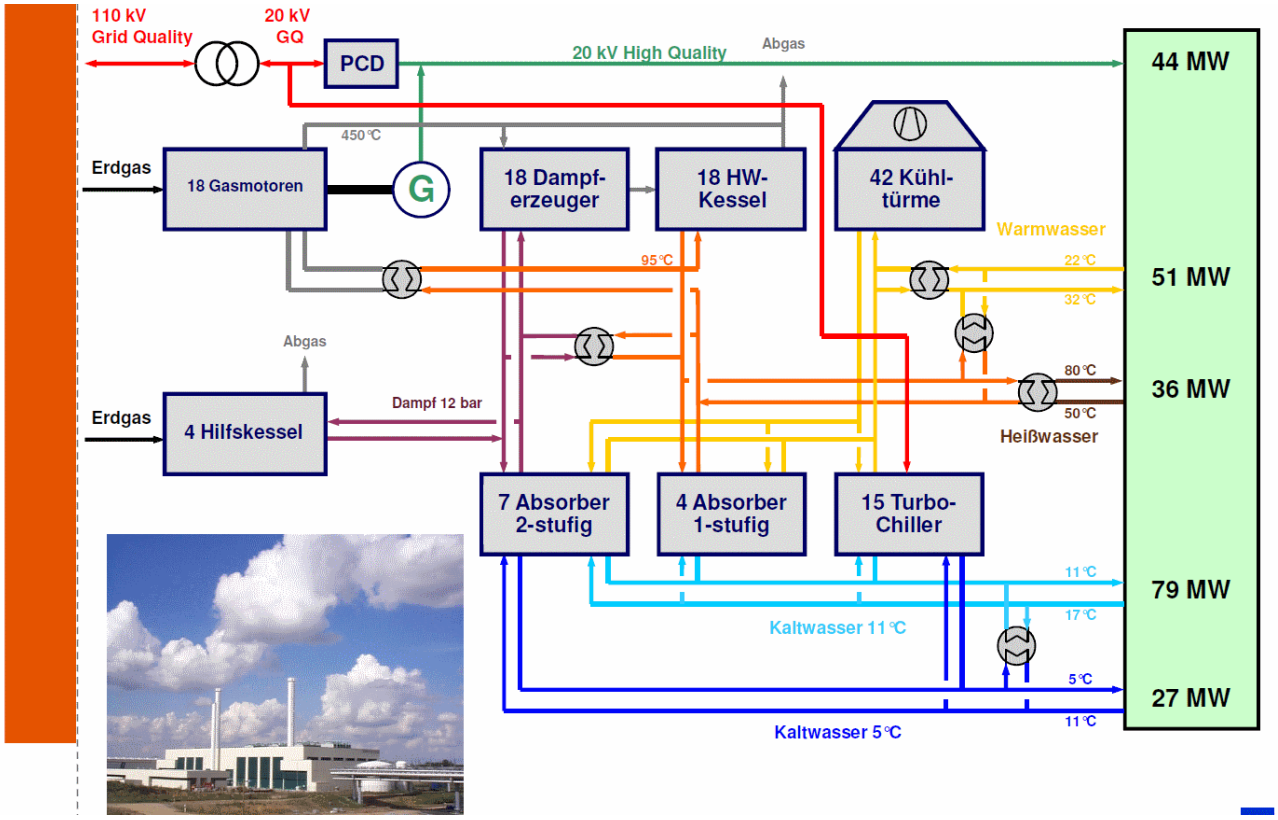
Abbildung 62: Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung mit BHKW (linkes Bild, rechter Bildteil) und Absorptionskältemaschine (linkes Bild, linker Teil) zur Klimatisierung eines gewerblichen Gebäudes (rechtes Bild) (Weidner 2008)

Im größeren Leistungsbereich wird das Effizienzpotenzial der höheren Temperatur des Motor-Abgases hingegen erfolgreich genutzt. In Abbildung 63 ist beispielhaft die Verknüpfung der verschiedenen Technologien zu einem hocheffizienten und wirtschaftlichen Energieverbundsystem gezeigt.

Das Energieversorgungszentrum (EVC) versorgt ein Werk des Halbleiterherstellers Globalfoundries (ehemals AMD) in Dresden mit Strom, Wärme und Kälte, wobei hohe Anforderungen an Versorgungssicherheit und Einhaltung der Parameter (z.B. +/- 0,5°C bei der Kälteversorgung) bei gleichzeitig hohen Lastschwankungen bestehen. Die Stromerzeugung erfolgt mittels Gasmotoren großer Leistung. Die Gesamtkapazität beträgt 44 MW_{el}. Die Abgaswärme wird zur Dampferzeugung genutzt. Der Dampf treibt zweistufige Absorptionskältemaschinen an, die ein Wärmeverhältnis von 1,3 erreichen. Parallel kann die Wärme aus der Öl- und Motorkühlung der Gasmotoren in einstufigen AKM zur Kälteerzeugung genutzt oder als Heizwärme zur Verfügung gestellt werden.

Für die Abdeckung von Spitzenlasten sind zusätzlich elektrisch betriebene Kaltwassersätze (Turbo-Chiller) installiert, die nur wenigen Stunden im Jahr betrieben werden. Insgesamt können bis zu 106 MW Klima- und Prozesskälte auf zwei Temperaturniveaus (5°C bzw. 11°C Vorlauftemperatur) bereit gestellt werden. Erdgas betriebene Hilfskessel dienen der Abdeckung thermischer Spitzenlasten.

Abbildung 63: Autarkes Energieversorgungssystem mit hocheffizienter KWKK im Energieversorgungszentrum der Globalfoundries-Fabrik (ehemals AMD) in Dresden (Brinckmann 2008)



6.3.2 Offene Verfahren

Bei offenen Verfahren steht der Arbeitsstoff (Wasser oder Wasserdampf) in direktem Kontakt mit der Atmosphäre. Diese Verfahren werden bei der Gebäudeklimatisierung in Lüftungsanlagen zur Luftentfeuchtung eingesetzt und dienen in Verbindung mit der Verdunstungskühlung zur direkten und gezielten Konditionierung der Zuluft. In der Fachliteratur ist dafür der englische Begriff „Desiccative Evaporative Cooling“ (DEC) geläufig.

Je nach verwendetem Sorptionsmittel wird bei der Luftentfeuchtung zwischen Feststoffverfahren und Verfahren mit flüssigem Sorptionsmittel unterschieden (siehe Abbildung 64). Bei den Feststoffverfahren werden meist sogenannte Sorptionsrotoren verwendet die eine mit Sorptionsmitteln versetzte Trägermatrix enthalten. Aufgrund der Drehbewegung des Rotors durchlaufen die einzelnen Rotorbereiche abwechselnd den Zuluftstrom (Entfeuchtung der Außenluft durch Adsorption des in der Luft enthaltenen Wassers) und den Abluftstrom (Desorption des Wassers durch warme Abluft). Dadurch ist der Betrieb eines kontinuierlichen Entfeuchtungsprozesses möglich. Der Vorteil des Feststoffverfahrens ist der relativ einfache Aufbau. Das Verfahren mit flüssigem Sorptionsmittel arbeitet nach dem gleichen Prinzip. Das aufkonzentrierte, flüssige Sorptionsmittel wird im Zuluftstrom verrieselt. Dabei kommt es zur Entfeuchtung der Zuluft und einer gleichzeitigen Verdünnung des Sorptionsmittels. Die Desorption bzw. Aufkonzentration des Sorbens gelingt anschließend in einem Regenerator unter Wärmezufuhr. Der Vorteil dieser Variante ist die Möglichkeit der Verwendung eines Sorptionsmittelspeichers. Bei dem Einsatz von solarthermischen Systemen zur Regeneration können einstrahlungsarme Zeiten gut überbrückt werden ohne die Funktion des Systems zu beeinträchtigen.

Abbildung 64: Verfahrensbeispiele zur sorptionsgestützten Gebäudeklimatisierung - links: Feststoffverfahren, rechts: Verfahren mit flüssigen Sorptionsmittel (Henning 2004)

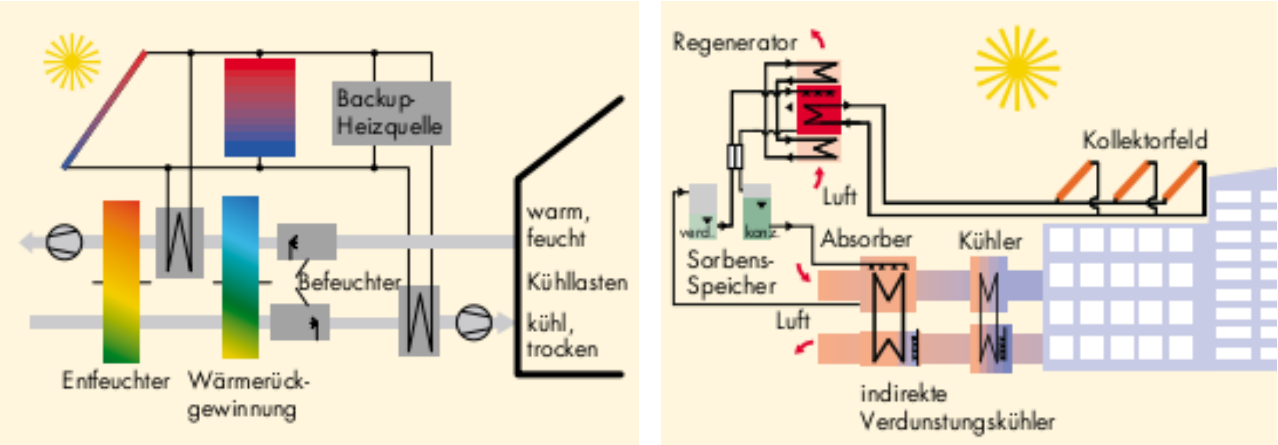


Tabelle 12: Verfahren der sorptionsgestützten Klimatisierung (Henning et al. 2009)

	Verfahren	
	Feststoffsorption	**Flüssigsorption**
Stoffsystem (Kältemittel/Sorptionsmittel)	Wasser/Silicagel Wasser/Lithiumchlorid	Wasser/Calciumchlorid Wasser/Lithiumchlorid
Stand der Technik	Komponenten marktverfügbar , Planungskenntnisse erforderlich	mehrere Pilotanlagen
Nennluftvolumenstrom	typischerweise > 5000 m^3/h	> 1000 m^3/h
Hersteller	Weltweit viele Sorptionsrotorhersteller (Klingenburg, Munters, DehuTech, Seibu Giken, ...) Mehrere Gerätehersteller (Robatherm, Munters, Siegle & Epple, ...)	Menerga
Typische Antriebstemperaturen	50-95°C	50-70°C

7 Vergleichende ökologische und ökonomische Bewertung ausgewählter Systeme

7.1 Einleitung und Herangehensweise

Im folgenden Teil dieser Studie werden verschiedene Kältesysteme zur Deckung der Kühllast in der Gebäudeklimatisierung (Nichtwohngebäude) und in der Industrie miteinander verglichen. Anhand konkreter Beispiele werden spezifische Vor- und Nachteile verschiedener Kältesysteme hinsichtlich ihrer Klimafreundlichkeit ermittelt. Untersucht werden Energiebedarf, TEWI (Total equivalent warming impact) sowie Jahresgesamtkosten. Für die Gebäudeklimatisierung wird darüber hinaus der Behaglichkeitsaspekt in die vergleichenden Betrachtungen einbezogen.

Die Basis der Bewertung sind dynamische Simulationen der Gebäude- und Anlagentechnik. Die Simulationen erfassen den gesamten Jahreszeitraum in unterschiedlichen Klimaregionen bei unterschiedlichen Klimaszenarien.

Beim Vergleich der Klimatisierungssysteme wird ein Bürogebäude mit quadratischer Grundfläche von 400 m^2 betrachtet. Das Lastszenario entspricht einer typischen Büronutzung.

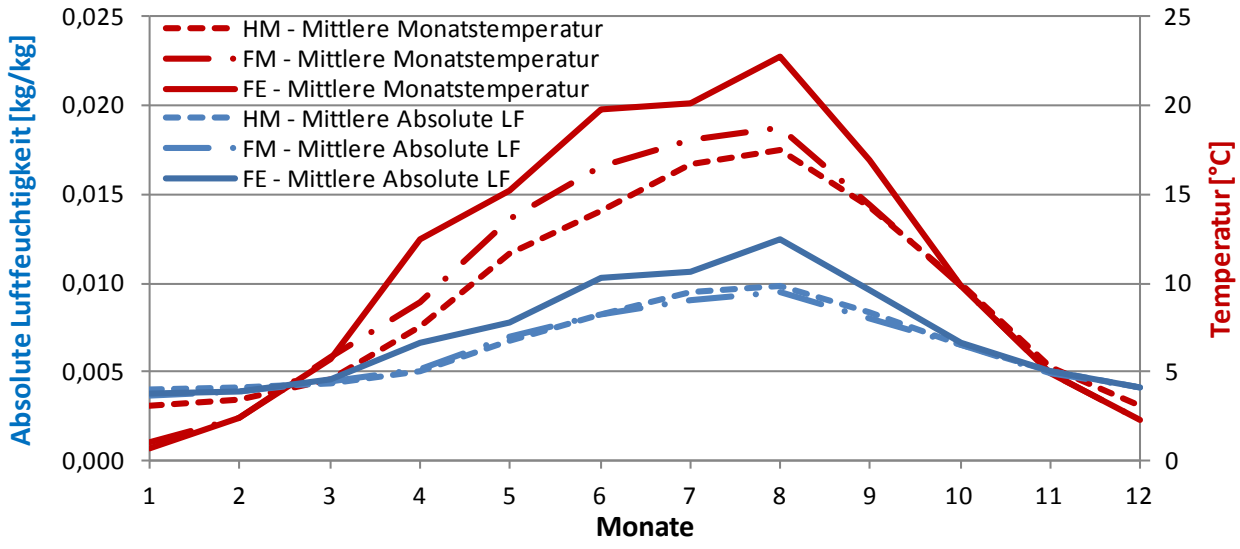
Für die Untersuchungen der Industriekältesysteme wird ein System mit einem ganzjährig konstanten Kältebedarf von 500 kW bei einer Kälteträger-Vorlauftemperatur von +2°C simuliert. Eine derartige Systemkonfiguration ist beispielsweise bei der Nahrungsmittelherstellung (Milchkühlung) denkbar.

Die Jahresgänge von Temperatur und Feuchtigkeit werden für zwei Klimaregionen mit folgenden Klimaszenarien gewählt (Meteonorm 2009):

- Frankfurt a. Main, Mittleres Jahr (F_M)
- Frankfurt a. Main, Extremer Sommer (F_E)
- Hamburg , Mittleres Jahr (H_M)

Die Durchführung der Gebäude- und Anlagensimulation erfolgt mit dem Programm TRNSYS.

Abbildung 65: Absolute Luftfeuchtigkeit und Temperatur der Klimaregionen und Klimaszenarien im Jahresverlauf



7.2 Berechnungsgrundlagen

7.2.1 Energiebedarf

Als Ergebnis der Simulation fallen Endenergiebedarfe in Form von Elektroenergie, Wärme aus KWK sowie Umweltwärme in Form von Solarenergie an. Hieraus lassen sich unter Berücksichtigung der entsprechenden Primärenergiefaktoren (siehe Tabelle 13) die Werte des Primärenergiebedarfes berechnen.

Tabelle 13: Primärenergiefaktoren (nicht erneuerbarer Anteil) nach (Robbi & Sander 2012) für die auftretenden Endenergieformen

Energieform und Energiequelle	Primärenergiefaktor f_p
Elektroenergie Strommix Deutschland	2,4
Wärme aus KWK auf Basis fossiler Brennstoffe	0,7
Wärme aus Solarthermie	0

7.2.2 TEWI

TEWI (Total Equivalent Warming Impact) ist ein Verfahren zur Berechnung des Beitrages zum Treibhauseffekt einer Kälteanlage. Der TEWI-Wert erfasst sowohl den direkten Beitrag durch Kältemittelemissionen (Leckagen, unsachgemäße Entsorgung) als auch den indirekten Beitrag der Kohlendioxid- und anderer Gasemissionen, welche durch die Umwandlung der für den Betrieb der Kälteanlage benötigten Energie während ihrer Lebensdauer entstehen. Die CO_2-äquivalenten Treibhausgasemissionen werden in Kilogramm CO_2 ermittelt (DIN-EN-378-1 2011).

Die Berechnung erfolgt nach DIN EN 378-1:

$$TEWI = \underbrace{GWP_{KM} \cdot L_{KA} \cdot n_{KA}}_{\text{direkter Anteil Leckage}} + \underbrace{GWP_{KM} \cdot m_{KM} \cdot \left(1 - \alpha_{Rüchgewinnung}\right)}_{\text{direkter Anteil Entsorgung}} + \underbrace{n_{KA} \cdot E_{End,Jahr,KA} \cdot \beta}_{\text{indirekter Anteil Antriebsenergie}}$$

Hierbei sind:

L_{KA}	jährliche Leckrate der Kälteanlage [kg/a]
n_{KA}	Betriebszeit der Kälteanlage [a]
m_{KM}	Kältemittelfüllmenge der Kälteanlage [kg]
$\alpha_{Rückgewinnung}$	Kältemittelrückgewinnungsanteil bei Entsorgung [%]
$E_{End,Jahr,KA}$	Endenergieverbrauch der Kälteanlage [kWh/a]
β	spezifische CO_2-Emissionen bezogen auf den Endenergieverbrauch [kg CO_2/kWh]

7.2.2.1 Direkter TEWI-Anteil – Leckage- und Entsorgungsverluste

Die Angaben über Kältemittelverluste durch Leckagen gehen in der Literatur weit auseinander. Die Informationen über die Größe der Kältemittelverluste wurden auf drei unterschiedlichen Wegen gewonnen:

- Zulässige Kältemittelverluste nach gültigen Gesetzen

- Schätzung der Verluste anhand der jährlichen Kältemittelproduktionsmengen (inklusive Import und Export) und Vergleich zum Bedarf installierter Neuanlagen
- Feldtests an installierten Anlagen mit gezielter Suche nach Leckagen und Bestimmung von Leckraten.

Im Anhang 11.1 finden sich quantitative Aussagen mit zugehörigen Quellenangaben. In der folgenden Tabelle 14 sind die verwendeten Werte dargestellt, die der nationalen Emissionsberichterstattung im Rahmen des Kyoto-Protokolls zugrunde liegen (Strogies & Gniffke 2013).

Eine der wenigen Studien, welche installierte Anlagen im Feld überprüfte (Birndt 1999), kommt zu dem Schluss, dass die überwiegende Zahl an Leckagen mit einem signifikanten Kältemittelverlust an lösbaren Verbindungen auftrat. Diese Erkenntnis kann auch zur Begründung der von *Öko-Recherche* ermittelten Daten (Tabelle 14) herangezogen werden. In mobilen Raumklimageräten werden in der Regel alle Verbindungen, wie auch bei Haushaltskältegeräten ausschließlich beim Hersteller verlötet, so dass hier relativ kleine Leckageverluste entstehen. Dem gegenüber weisen Multi-Split-Klimageräte und VRF-Geräte oft Schraubverbindungen an allen Innengeräten auf, was zu einer wesentlich höheren Leckrate führt.

Tabelle 14: Auf die Kältemittelfüllmengen bezogene Leckraten und Entsorgungsverluste verschiedener Kälteanlagen (Daten zur amtlichen Berichterstattung ab 2012 (Strogies & Gniffke 2013)

Gerätetyp	jährliche Leckrate	Entsorgungsverlust	durchschn. Lebensdauer
Mobile Raumklimageräte	2,5%	70%	10 a
Splitgeräte	5,0%	70%	10 a
Multi-Split-Geräte	6,0%	30%	13 a
VRF-Geräte	7,0%	30%	13 a
Turbo- bzw. Zentrifugalchiller	4,0%	30%	25 a
Chiller > 100 kW	4,0%	30%	15 a
Chiller < 100 kW	4,0%	30%	15 a

7.2.2.2 Direkter TEWI-Anteil – GWP-Werte

Das GWP (Global Warming Potential) ist ein Vergleichsfaktor zur Bestimmung des Treibhauseffektes eines in die Atmosphäre gebrachten Stoffes, ausgedrückt in CO_2-Äquivalenten. Es berücksichtigt den Einfluss von Treibhauswirksamkeit und Verweilzeit der Moleküle in der Atmosphäre. Die in Tabelle 15 dargestellten Zahlen entstammen dem 4th Assessment Report des IPCC aus dem Jahr 2007 (Forster & Ramaswamy 2007). Sie gelten ab 2013 verbindlich für die Treibhausgas-Berichterstattung gemäß Kyoto-Protokoll.

Tabelle 15: GWP-Werte für die in den Technologievergleichen verwendeten Kältemittel (Forster & Ramaswamy 2007)

Kältemittel	Typ	Bezeichnung / Zusammensetzung	GWP-Wert
R134a	HFKW	1,1,1,2-Tetrafluorethan	1430
R410A	HFKW-Blend	Gemisch aus R32 und R125	2087,5
R1234yf	HFKW	2,3,3,3,Tetrafluorprop-1-en	4
R290	KW	Propan	3,3

R717	natürliches KM	Ammoniak	0
R718	natürliches KM	Wasser	0
R723	natürliches KM	Gemisch aus Dimetylether und Ammoniak	8
R744	natürliches KM	CO_2	1

7.2.2.3 Indirekter TEWI-Anteil

Der indirekte TEWI-Anteil erfasst die den Antriebsenergien zuzuordnenden CO_2-Emissionen. Die Antriebsenergie berücksichtigt alle für den Anlagenbetrieb notwendigen Energieströme. Neben Hauptkomponenten wie z.B. dem Verdichter einer Kompressionskälteanlage wird auch der zusätzliche Energiebedarf für Pumpen, Ventilatoren, Rückkühler usw. berücksichtigt.

In den untersuchten Varianten gibt es drei Formen von Antriebsenergie: Elektroenergie, Wärme aus einem BHKW bzw. KWK sowie Umweltenergie in Form von Solarwärme. Die spezifischen CO_2-Emissionen der unterschiedlichen Antriebsenergieformen werden auf Grundlage der in Abschnitt 4.2.10 durchgeführten Betrachtungen und daraus abgeleiteten Werten (Tabelle 4, S. 63) in den durchgeführten Berechnungen berücksichtigt:

- Elektroenergie: 583 g/kWh
- Wärme aus KWK je nach Bewertungsmethode: 0 / 44 / 239 g/kWh
- Wärme aus Umweltenergie: 0 g/kWh

7.2.3 Kosten der Kältesysteme

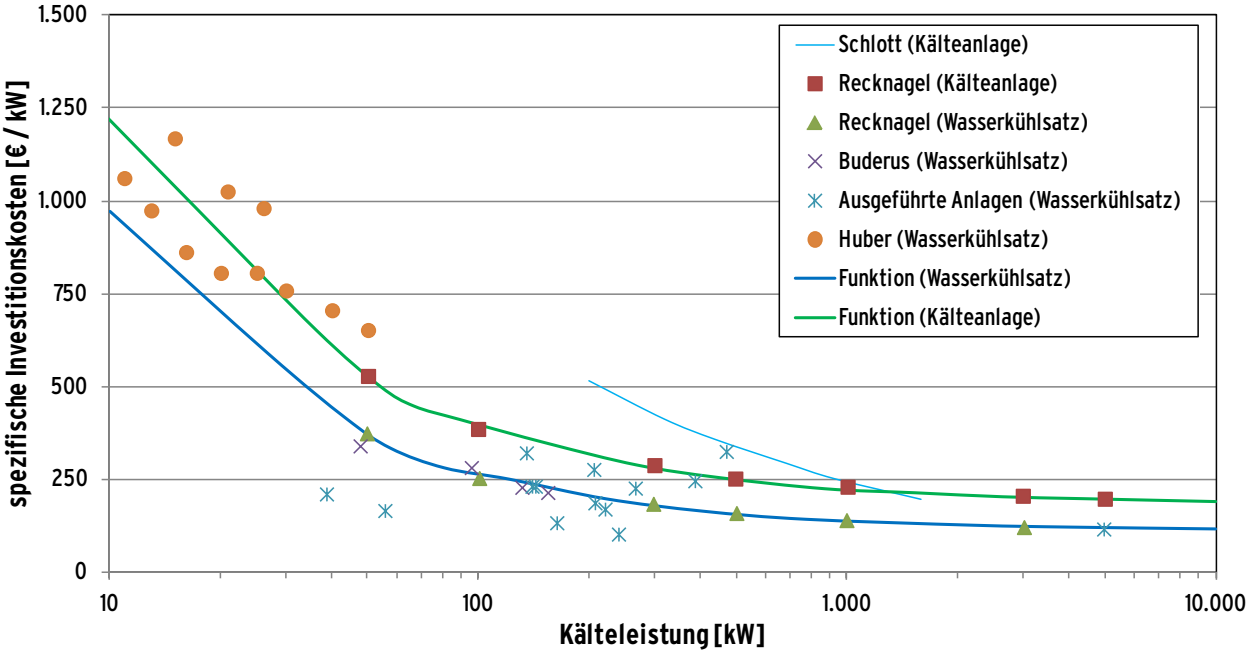
Neben den energetischen und ökologischen Eigenschaften spielen die Kosten eines speziellen Kältesystems eine wesentliche Rolle bei dessen Auswahl. Die Gesamtkosten eines Kältesystems lassen sich in die folgenden vier Kostenbestandteile untergliedern:

- Investition (Erwerb, Montage und Inbetriebnahme der Anlage, etc.)
- Betrieb (Kosten zur Deckung des Energiebedarfs, Wasserkosten etc.)
- Instandhaltung (Wartung, Inspektion, Reparaturen)
- Entsorgung

Die Investitionskosten werden von unterschiedlichen Faktoren beeinflusst. Die Kosten für den Anlagenerwerb variieren je nach Hersteller und Lieferant. Kältesysteme werden gewöhnlich von Anlagenbauern komplett mit Lieferung, Montage, Inbetriebnahme und Gewährleistung angeboten. Der Preis ist deshalb stark von den Gegebenheiten vor Ort abhängig (Wettbewerbssituation, Struktur und Größe des Gebäudes, Aufstellungsort der Kälteanlage, etc.). In der Literatur sind Kostenfunktionen für Anlagen zur Kälteerzeugung zu finden. Diese spiegeln marktübliche spezifische Investitionskosten von Anlagen bzw. Anlagenkomponenten in Abhängigkeit der Leistungsgröße wider. Als Beispiel kann der IUTA-Preisatlas (IUTA 2002) genannt werden (siehe Abbildung 66). Die Funktionen beruhen auf verschiedenen Einzelangaben und Statistiken zu den entsprechenden Kosten. Das sich hieraus ergebende Spektrum ist sehr umfangreich. Trotzdem sind Kosten, die aus speziellen Systemanforderungen bzw. -konfigurationen bspw. für die Sicherheitsvorkehrungen beim Einsatz von Ammoniak als Kältemittel erwachsen, sind gewöhnlich nicht enthalten. Die genaue Ermittlung von Investitionskosten erfordert immer eine individuelle Planung des konkreten Anwendungsfalls. Als Berechnungsgrundlage für die vorliegende Studie dienen auf den IUTA-Preisatlas

aufbauende und aktualisierte Kostenfunktionen (Wiemken, Elias & Nienborg 2012), dem ILK Dresden vorliegende Rechnungen zu installierten Anlagen sowie eingeholte Einzelangebote. Die Preissteigerung seit dem Zeitpunkt der Preisermittlung bzw. Rechnungsstellung wird nach dem VCI-Preisindex (Apparate und Maschinen) (VCI 2012) berücksichtig. Mithilfe des Annuitätsverfahrens werden die ermittelten Investitionskosten analog zur VDI 2067 über die Nutzungsdauer in jährliche Kosten umgerechnet. Dabei wird ein Marktzins von 6 % angenommen. Richtwerte zur Lebensdauer der Kälteanlagen sind den Normen DIN EN 13779:2004, VDI 2067 sowie DIN EN 15459 entnommen. Die dem Kostenvergleich zugrundeliegenden Preise und deren Quellen sind in Tabelle 49 bis 51 im Anhang aufgeführt.

Abbildung 66: Beispiele für Kosten und Kostenfunktionen zu Kompressionskälteanlagen (IUTA 2002)



Die Betriebskosten werden von den Kosten zur Energiebereitstellung (elektrische Energie, Wärme) dominiert. In die Berechnung der Energiekosten fließen zwei wichtige Parameter ein: zum einen der Energiebedarf des Kältesystems und zum anderen die Kosten pro Energieeinheit. Für die speziellen Kältesysteme und Anwendungsbedingungen, welche in dieser Studie berücksichtigt wurden, ergibt sich der jeweilige Energiebedarf aus den Berechnungsergebnissen. Die Energiekosten jedoch hängen von den Einkaufsbedingungen ab: Die Preise für Elektroenergie bewegen sich aktuell zwischen 0.05 EUR/kWh (stromintensiver Industriebetrieb) und 0.26 EUR/kWh (Privathaushalt) (Erneuerbare Energien 2012). Sehr unterschiedlich wird in der Literatur zu dem Thema zukünftige Energiepreisentwicklung Stellung bezogen. Nach einer Energieprognose des BMWi (BMWI 2010) aus dem Jahr 2009 sollen sich die Strompreise von 2012 bis 2030 auf einem nahezu konstanten Niveau bewegen. Eine aktuellere, vom Europäischen Parlament in Auftrag gegebene Studie aus dem Jahr 2011 (Kafsack 2011; E.-K. EC 2011) prognostiziert einen weiteren Anstieg der Strompreise bis 2030 um ca. 50 %. Ähnliches geht aus einer Prognose hervor, die vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft in Baden-Württemberg in Auftrag gegeben worden ist und 2012 erschien (Leipziger Institut für Energie GmbH 2012). Hier wird von einer Strompreissteigerung bis 2020 je nach Berechnungsmodell in der Industrie von 3 bis 34 % und im Gewerbe von 13 bis 24 % ausgegangen. Es ergibt sich ein breites Spektrum an möglichen Strompreisszenarien.

Gründe hierfür sind die unkalkulierbaren Einflussfaktoren wie z.B. Brennstoffpreisentwicklung oder die Höhe des zukünftigen Anteils regenerativen Stroms und dessen Kosten.

In der vorliegenden Studie finden verschiedene Szenarien Berücksichtigung. Szenarien, bei denen energieintensive Betriebe berücksichtigt sind, werden mit 0,05 EUR/kWh relativ geringe Strompreise zugrunde gelegt. Im Gegensatz dazu berücksichtigen andere Szenarien kleinere Gewerbebetriebe mit Preisen von 0,20 EUR/kWh. In allen Szenarien wird eine jährliche Preissteigerung von 2,28 % veranschlagt, was einer Gesamtsteigerung von 50 % von 2012 bis 2030 entspricht. Gerechnet wird dann mit einem für den Zeitraum 2012 bis 2030 mittleren Strompreis von 0,06 EUR/kWh bzw. 0,25 EUR/kWh. In Tabelle 16 sind die berechneten Szenarien dargestellt.

Auch bei Fernwärme bestehen große Preisunterschiede, die jedoch weniger vom Energiebedarf, sondern überwiegend von regionalen Gegebenheiten abhängig sind. So wurden im Jahr 2009 in verschiedenen deutschen Großstädten Preise für Privathaushalte zwischen 68 EUR/MWh (Chemnitz) und 138 EUR/MWh (Schwerin) berechnet (BBU 2009). Auch die Durchschnittspreise innerhalb der einzelnen Bundesländer sind sehr unterschiedlich. In einer Erhebung der Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft (AGFW) aus dem Jahr 2010 reichen die Preise von 58 EUR/MWh (Rheinland-Pfalz, Abnahmefall 600 kW) bis 83 EUR/MWh (Thüringen, Abhnahmefall 15 kW) (Wärme 2010). Bezüglich der Brennstoffpreise ergibt sich nach Einschätzung der Deutschen Energie-Agentur bis 2030 eine Steigerung von ca. 20 % (Höflich et al. 2012), was einer jährlichen Preissteigerung von 1,02 % entspricht und sich entsprechend auf die Preise der Fernwärme übertragen lässt.

Für die Preisszenarien zur Betriebskostenberechnung werden ebenfalls unterschiedliche Wärmepreise angenommen (siehe auch Tabelle 16). Bei Szenarien mit kostenfreier Abwärmenutzung (Szenarien 1 und 3) wird ein Wärmepreis von 0 EUR/MWh festgelegt. Ansonsten gilt der deutschlandweite Mittelwert von 69 EUR/MWh (Abnahmefall 600 kW). Bei einer Preissteigerungsrate von 1,02 % resultiert ein mittlerer Preis von 77 EUR/MWh für den Zeitraum 2012 bis 2030.

Tabelle 16: Den Betriebskostenberechnungen zugrundeliegende Preise für Strom und Wärme für verschiedene Preis-Szenarien

	Betrieb Energie-intensiv	kostenfreie Abwärme	Energie-form	Preis [EUR / kWh]	Wartungskosten (bezogen auf Investitionskosten)	Wasser-kosten [EUR / m³]	Entsorgungs-kosten [EUR / a]
Szenario 1	●	●	Strom	0,06	4 %	4,81	54
			Wärme	0,00			
Szenario 2	●	○	Strom	0,06			
			Wärme	0,08			
Szenario 3	○	●	Strom	0,25			
			Wärme	0,00			
Szenario 4	○	○	Strom	0,25			
			Wärme	0,08			

Neben den Energiekosten ergeben sich bei einigen der untersuchten Systeme zusätzlich Wasserkosten (z.B. durch offene Rückkühlung des AKM-Systems oder adiabate Kühlung des DEC-Systems). Die Wasserpreise steigen in Deutschland jährlich um ca. 1 % (DeStatis 2010). Die

spezifische Frischwasserkosten inkl. chemischer Zusätze werden mit 3,50 EUR/m^3, die der Abwasserkosten mit 2,00 EUR/m^3 angenommen (Asmus 2010). Es wird angenommen, dass 40 % des zugeführten Wasser abgeschlämmt wird, um die Aufkonzentration von Feststoffen (Salze, Mineralien) zu vermeiden (Asmus 2010). Die Simulationsergebnisse liefern den Bedarf an zu verdunstendem Wasser. Dieser entspricht nur einem Teil der zuzuführenden Frischwassermenge. Darüber hinaus muss der Betrag des abgeschlämmten Wasser gleichzeitig als Frischwasser und als Abwasser in die Kostenberechnungen einbezogen werden. Mit dem o.g. Abschlämmanteil ergibt sich eine zuzuführende Frischwassermenge von 5/3 der verdunsteten Wassermenge. Die entstehenden Kosten für Wasserbereitstellung und Abwasserentsorgung können mit den o.g. Preisen zu 4,81 EUR/m^3 (bezogen auf die zuzuführende Frischwassermenge) errechnet werden. In diesem Wert ist bereits die oben genannte Preissteigerung von 1 % sowie eine Mittelwertbildung für den Zeitraum 2012 bis 2030 enthalten.

Eine Schätzung der Instandhaltungskosten der verschiedenen Systeme wird folgendermaßen vorgenommen. In vorliegenden Wartungsverträgen sind Kosten für die jährliche Wartung und Inspektion für Kompressionskälteanlagen von 1,1 % bis 2,6 %, bezogen auf die Investitionskosten, angegeben. Diese Verträge decken u.a. die jährlichen Funktions- und Sicherheitsüberprüfungen sowie Reinigungsmaßnahmen an Filtern und Verflüssigern ab. Ebenso enthalten ist die gesetzlich geforderte Kontrolle auf Dichtheit des Kältekreislaufes bei HFKW-Kältemitteln in Abhängigkeit der Füllmenge gemäß F-Gase-Verordnung. Die Ausführung der Kälteanlage (Kaltwassersatz oder Direktverdampfer), die Anlagenleistung sowie die Beschaffenheit des Kältenetzes beeinflussen diese Kosten wesentlich. Instandsetzungsarbeiten werden von diesen Verträgen nicht abgedeckt und führen beim Eintreten von Störungen zu höheren Instandhaltungskosten. Weiterhin liefern die DIN EN 13779:2004, die VDI 2067 sowie die DIN EN 15459 Richtwerte für Instandhaltungskosten verschiedener Anlagenkomponenten. Für Komplettanlagen sind in den Normen 4 % der Investitionskosten angesetzt. Dieser Wert erscheint angesichts der recherchierten Wartungskosten plausibel und wird bei den Berechnungen zugrunde gelegt.

Entsorgungskosten werden in den Normen (z.B. EN 15459) nicht oder nur lückenhaft behandelt. Angaben zur Entorgung von Komplettanlagen sind hier nicht zu finden. Allgemein gültige Richtwerte können Kälteanlagenbauer nicht liefern, da hier von Fall zu Fall kalkuliert werden muss. Es spielen ähnliche Kriterien wie bei der Instandhaltung eine Rolle (Ausführung und Leistungsgröße der Anlage, Beschaffenheit des Kältenetzes und Art des Kältemittels). Darüber hinaus werden Entsorgungs- und Demontagekosten bei einem reinen Rückbau einer Kälteanlage anders verrechnet als bei der Erneuerung einer Anlage. Ein relativ ungünstiger Fall ist der reine Rückbau einer mit HFKW-Kältemitteln betriebenen direktverdampfenden Kälteanlage. Nach Angaben eines Kälteanlagenbauers würden dafür sowie für die Entsorgung des Kältemittels insgesamt ca. 2 % der Investitionskosten berechnet werden müssen. Bei einer Lebensdauer der Anlage von ca. 15 Jahren ergäbe sich daraus eine Annuität im Bereich von 1 – 2 ‰ der Investitionskosten. Die Entsorgungskosten sind damit eine Größenordnung niedriger als die Instandhaltungskosten und spielen eine untergeordnete Rolle bei der Berechnung der Gesamtkosten einer Kälteanlage. Sie werden der vollständigkeit wegen in den Berechnungen mitberücksichtigt. Für alle Kältesysteme wird jedoch der gleiche absolute Betrag (beruhend auf den oben genannten Kosten eines direktverdampfenden Systems) einbezogen.

7.3 Gebäudeklimatisierung

7.3.1 Ausgewählte Kältesysteme

Alle untersuchten Systeme werden im Folgenden mit Anlagenschaltung und wesentlichen Parametern erläutert. Ausführliche Informationen zu den einzelnen Systemen finden sich im Anhang (ab S. 219).

7.3.1.1 Variante 1: AKM – System mit solargetriebener Absorptionskältemaschine

Variante 1 ist eine wärmegetriebene Wasser/LiBr-Absorptionskältemaschine (AKM). Die Kälteverteilung im Gebäude erfolgt über ein Kaltwassernetz, die Raumkühlung über Kühldecken. Die Antriebswärme wird durch ein Flachkollektorfeld gewonnen. Das System ist redundant ausgelegt, so dass in Zeiten ohne Solarstrahlung bei gleichzeitigem Kältebedarf Fernwärme als Heizquelle genutzt werden kann. Die Rückkühlung erfolgt über einen offenen Nasskühlturm. Abbildung 67 zeigt die Anlagenschaltung mit den Hauptkomponenten. Eine Kühldecke

übergibt die erzeugte Kälte an den Raum. Für diese wird eine Soll-Vorlauftemperatur des Kälteträgers von 14 °C vorgegeben. Eine Regelung der Vorlauftemperatur mit Taupunktüberwachung im Gebäude verhindert die Kondensatbildung an der Kühldecke. Tabelle 17 gibt einen Überblick über die wichtigsten Systemparameter.

Abbildung 67: RI-Schaltbild der Variante 1 - Solargetriebes Absorptionssystem

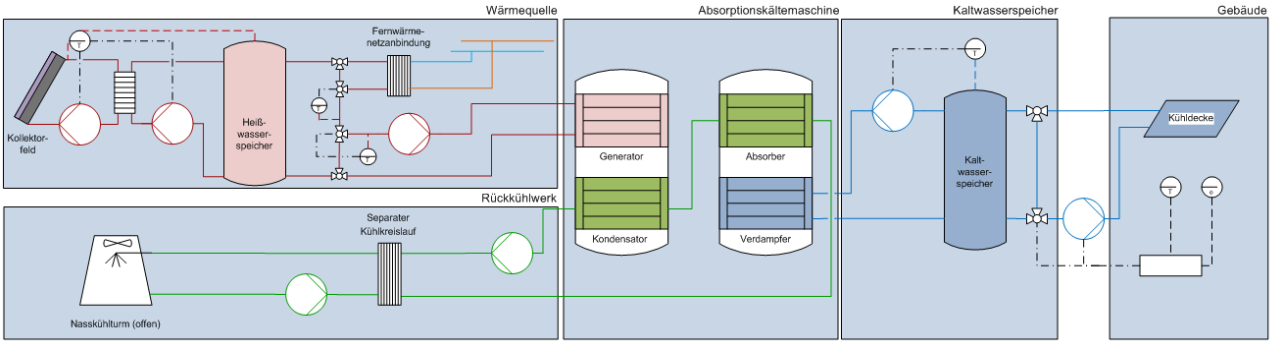


Tabelle 17: Systemparameter des solargetriebenen Absorptionssystems

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Nennleistung Absorptionskältemaschine[8]	$Q_{0,N,AKM}$	25,0	kW
Kollektorfläche gesamt	$A_{o,Kol,ges}$	90,0	m^2
Nennleistung Kühlturm[9]	$Q_{RK,N,NKT}$	79,0	kW
Heißwasserspeicher	$V_{Sp,HW}$	1,5	m^3
Kaltwasserspeicher	$V_{Sp,KaW}$	2,0	m^3
Kühldeckenoberfläche	$A_{o,KD}$	400,0	m^2

7.3.1.2 Variante 2: VRF – Multi-Split-VRF-System

Split- bzw. Multi-Split-Systeme gehören zur Gruppe der Kompressionskälteanlagen. Die Wärme- bzw. Kälteverteilung im Gebäude wird direkt über das im Kältekreislauf befindliche Kältemittel realisiert. Die Kälteübergabe vom Kältemittel zur Raumluft erfolgt in Luft-Konvektoren. In die Untersuchung wird ein Multi-Split-VRF-System einbezogen. Die Bezeichnung „Multi“ steht hier für ein Außengerät, welches mit mehreren Konvektoren (Verdampfer, Innengeräte) verbunden ist, die in verschiedenen Räumen installiert sein können. Die Kälteleistung kann über einen drehzahlregelbaren Verdichter und damit einem variablen Volumenstrom des Kältemittels (Variable Refrigerant Flow) geregelt werden. Das betrachtete System entspricht einer Teilklimaanlage ohne Befeuchtungsfunktion. Die ungeregelte Entfeuchtung der Luft aufgrund von Wasserkondensation am Verdampfer wird berücksichtigt. Das System beinhaltet keine Lüftungsfunktion, diese wird von einem unabhängigen System übernommen (siehe Gebäudemodell, Abschnitt Gebäudemodell 7.3.2.1, S. 121). Der schematische Aufbau des modellierten Systems ist in Abbildung 68 dargestellt. Bei den Berechnungen wird ein Großraumbüro (Ein-Zonen-Modell) mit idealer Luftvermischung angenommen. Im Berechnungsmodell können damit mehrere Konvektoren zu einem entsprechend leistungsfähigen Konvektor zusammengefasst werden.

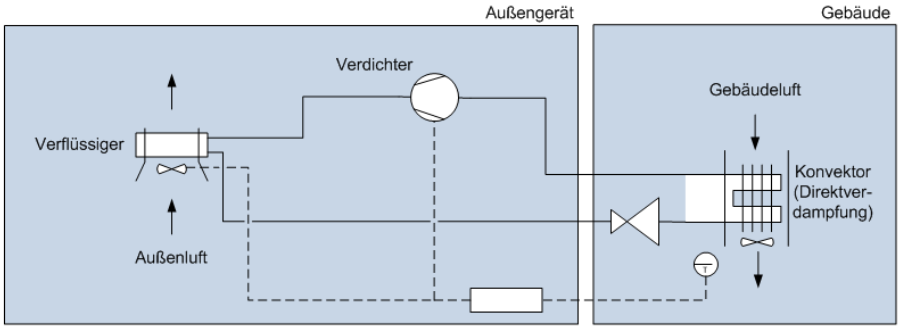
[8] Nennleistung bei t_{HW} = 85/75 °C, $t_{KüW}$ = 28/33 °C, t_{KaW} = 12/6 °C

[9] Katalogwert Gohl-Dunsturm 6Z für $t_{KüW}$ = 34/27 °C bei t_{FK} = 21 °C (Gohl, 2009)

Tabelle 18: Wichtige Systemparameter des Multi-Split-VRF-Systems

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Nennkälteleistung	$Q_{0,N,VRF}$	25	kW
Verdampfungstemperatur	$t_{0,VRF}$	6	°C
Kältemittel	-	R410A	-
Kältemittelmenge	m_{KM}	20	kg

Abbildung 68: R-I-Schema eines Split-Klima-Systems



7.3.1.3 Variante 3: KWS – Kaltwassersatz betrieben mit Kompressionskältemaschine

Die Kälteversorgung mit einem Kaltwassersatz (KWS) erfolgt im Wesentlichen durch einen Kaltwassererzeuger in Kombination mit einem System zur Kälteübergabe im Gebäude. Der prinzipielle Aufbau des KWS entspricht dem eines direktverdampfenden Split-Systems. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass der Transport von Kälteenergie zum Verbraucher nicht direkt durch Kältemittel, sondern indirekt über einen separaten Kälteträgerkreislauf (Kaltwasser) realisiert wird. Wie in

dargestellt, befindet sich der Verdampfer des Kältekreislaufes bei einem KWS-System im Kaltwassererzeuger. Da der Kälteträgerkreislauf ausschließlich ein Medium im flüssigen Zustand führt, ergebenen sich mehrere Möglichkeiten zur Gestaltung von Kältespeichern (Kaltwasserspeicher) und Varianten der Kälteübergabe (neben Luftkonvektoren auch Kühldecken oder Bauteilaktivierung). In Variante 3 werden verschiedene Konzepte berücksichtigt.

Var. 3a – Kaltwassersatz mit Luft-Konvektoren zur Kälteübergabe

Ähnlich wie bei dem direktverdampfenden Split-System kann die Kälteübergabe mit Luft-Konvektoren erfolgen. Wie schon bei dem Multi-Split-VRF-System werden auch bei dem Simulations-Modell des Kaltwassersatzes die Luft-Konvektoren zu einem einzelnen Konvektor zusammengefasst.

Diese Variante erfährt eine Ergänzung durch die Variation der eingesetzten Kältemittel. Dabei werden die dem Modell zugrundeliegenden Stoffdatenbanken dem jeweiligen Kältemittel angepasst. Um die Anzahl der zu berechnenden Systeme überschaubar zu halten, wird das Gesamtmodell für die verschiedenen Kältemittel (R410a, R290, R134a, R717, R1234yf) jedoch nicht verändert. Durch eine auf das jeweilige Kältemittel abgestimmte technische Lösungen (z.B. interner Wärmeübertrager) kann eine höhere Anlageneffizienz erreicht werden.

Bei Kompressionskälteanlage mit Wasser als Kältemittel (R718) sind Modellanpassungen aufgrund der besonderen physikalischen Eigenschaften dieses Kältemittels zwingend erforderlich. Das Verdampfen von Wassers bei den geforderten niedrigen Temperaturen macht

einen sehr niedrigen Druck erforderlich (für 2 °C ca. 7 mbar). Das Druckverhältnis zwischen den Sättigungsdrücken bei Kondensation und Verdampfung ist dagegen außerordentlich hoch. Die geringe Dichte von Wasser resultiert zudem in großen Volumenströmen des gasförmigen Kältemittels und macht den Einsatz von Turboverdichtern mit begrenztem Druckverhältnis erforderlich. In R718-Kaltwassersätzen werden deswegen zwei Verdichterstufen in Reihe geschaltet (siehe Abbildung 70). Wegen der hohen Verdichtungsendtemperaturen erfolgt eine Zwischenkühlung.

Eine Besonderheit bei der Verwendung von Wasser als Kältemittel ist die Stoffgleichheit von Kältemittel und Kälteträger. Deswegen könnte auf einen trennenden Wärmeübertrager verzichtet werden. Das flüssige Kältemittel Wasser kann direkt in den Kälteträgerkreislauf gepumpt werden. Die Temperaturdifferenz zwischen Kältemittel und Kälteträgeraustritt ist in diesem Fall minimal. In der Praxis werden Direktverdampfer mit Wasser als Kältemittel bei der Vakuumeiserzeugung eingesetzt.

Abbildung 69: R-I-Schema des Kaltwassersatz-Modells mit Kälteübergabe durch Luft-Konvektoren

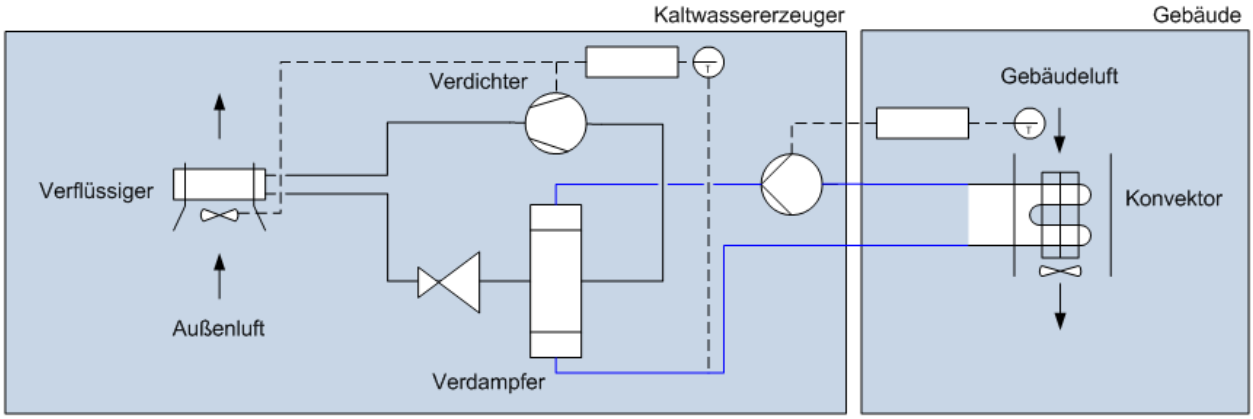
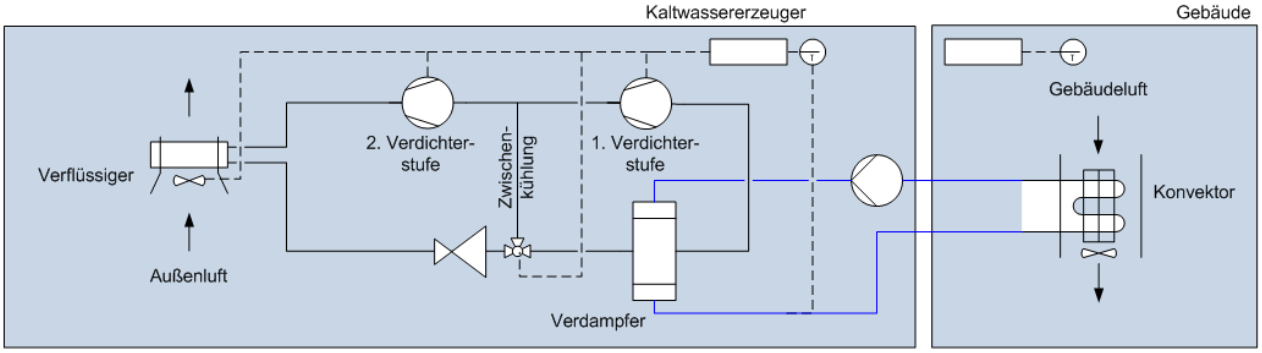


Abbildung 70: R-I-Schema des Kältesystems mit Wasser als Kältemittel (R718)



Variante 3b – Kaltwassersatz mit Kühldecke zur Kälteübergabe

Als Alternative zum Luftkonvektor wird hier der Einsatz einer Kühldecke betrachtet. Hierdurch werden große Kühlflächen möglich, die eine Deckung der Kältelast auch bei relativ hohen Kaltwasservorlauftemperaturen erlauben (im Modell wird eine Soll-Temperatur von 14 °C vorgegeben). Dadurch kann der Kaltwassererzeuger bei höheren Verdampfungstemperaturen und Leistungszahlen betrieben werden. Gleichzeitig müssen keine zusätzlichen Ventilatoren zur Kälteübergabe eingesetzt werden, wodurch eine erhebliche Einsparung an elektrischer Energie möglich ist. Nachteil eines solchen Systems ist die Gefahr der Kondensatbildung an der

Decke. Im Modell wird daher die Taupunkttemperatur im Raum überwacht und die Wasservorlauftemperatur entsprechend angepasst, um eine Taupunktunterschreitung auszuschließen.

Variante 3c – Kaltwassersatz mit Kaltwasserspeicher

Bei dieser Variante erfolgen die Kälteerzeugung, der Kältetransport sowie die Kälteübergabe analog zu dem KWS-System (Variante 3a). Mit einem zusätzlich integrierten Speicher ist es möglich, Kälte zu speichern, die bei günstigen Betriebsbedingungen effizient erzeugt wird. Der Speicher kann in den Nachtstunden, bei niedrigen Außentemperaturen mit besserer Energieeffizienz geladen und bei hohen Außentemperaturen zur Kälteversorgung genutzt werden. Übersteigt die Speichertemperatur einen definierten Schwellenwert oder soll der Speicher für die Kaltwasserbereitstellung nicht verwendet werden, ist er durch einen Bypass überbrückbar. Eine Rücklaufbeimischung lässt auch bei niedrigeren Speichertemperaturen das Einstellen der gewünschten Vorlauftemperatur zum Konvektor zu.

Abbildung 71: R-I-Schema des Kaltwassersatz-Modells mit Kaltwasserspeicher

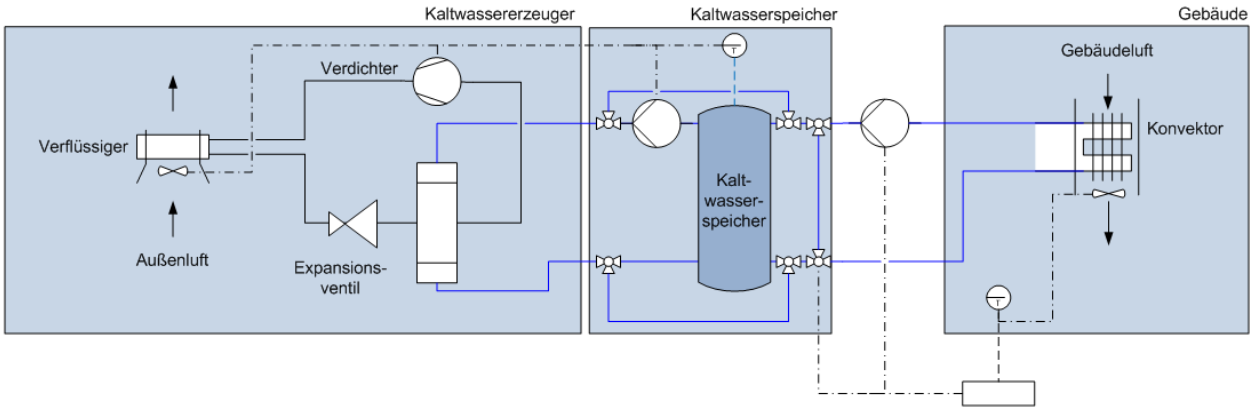


Tabelle 19: Wichtige Systemparameter des KWS-Systems (mit verschiedenen Kältemitteln wurde nur Variante 3b für den KWS ohne Speicher und Kühldecke berechnet)

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Nennkälteleistung	$\dot{Q}_{0,N,KWS}$	25	kW
Vorlauftemperatur des Kälteträgers (Konvektor / Kühldecke)	$t_{VL,KWS}$	10 / 14	°C
Rücklauftemperatur des Kälteträgers	$t_{RL,KWS}$	variabel	°C
Speichervolumen	V_{Sp}	7,5	m^3
Ladetemperatur des Speichers	$t_{sp,min}$	6	°C
Kältemittel	-	R410A (R290, R134a, R717, R718, R1234yf, R32)	-
Kältemittelmenge (R410A, R134a, R1234yf)	$m_{KM,KWS}$	8	kg

7.3.1.4 Variante 4: RLT – Raumlufttechnischen Anlage mit DEC-System unter Nutzung von BHKW-Abwärme

Dieses System unterscheidet sich in einem wesentlichen Punkt von allen anderen betrachteten Systemen. Es handelt sich hier um eine raumlufttechnische Anlage (RLT), die so konzipiert ist, dass der gesamte Kältebedarf durch eine gezielte Konditionierung zugeführter Außenluft realisiert wird (anders als bei den anderen Systemen, bei denen im Wesentlichen die Innenluft des Gebäudes gekühlt wird), ohne die Verwendung eines zusätzlichen Kälteträgers. Die Zuluft

wird mit Hilfe des DEC-Systems (Desiccative and Evaporative Cooling) entfeuchtet und gekühlt. Für die Simulation wird das Funktionsprinzip der Flüssigsorption zugrunde gelegt. Die Außenluft wird in dem Absorber im Kontakt mit einem Sorptionsmittel entfeuchtet. Bei der Entfeuchtung steigt die Lufttemperatur. Die trockene und warme Zuluft wird anschließend über einen Wärmeübertrager gegen die kühlere Abluft gekühlt. Die Ablufttemperatur wird durch das Verdunsten von Wasser gesenkt. Die Zulufttemperatur liegt unterhalb der Temperatur der ungekühlten Abluft. Das Wasser im Sorptionsmittel wird im Regenerator, unter Nutzung von BHKW-Abwärme, wieder ausgetrieben.

Die Entfeuchtung der Außenluft im Absorber lässt sich an den Bedarf anpassen. Bei Außentemperaturen unterhalb der gewünschten Raumtemperatur ist eine freie Kühlung möglich. Sinkt die Außentemperatur deutlich unter die Raumtemperatur, ermöglicht der im System integrierte Wärmeübertrager eine effiziente Wärmerückgewinnung aus der Abluft.

Abbildung 72: R-I-Schema der RLT-Anlage mit sorptionsgestützter Klimatisierung

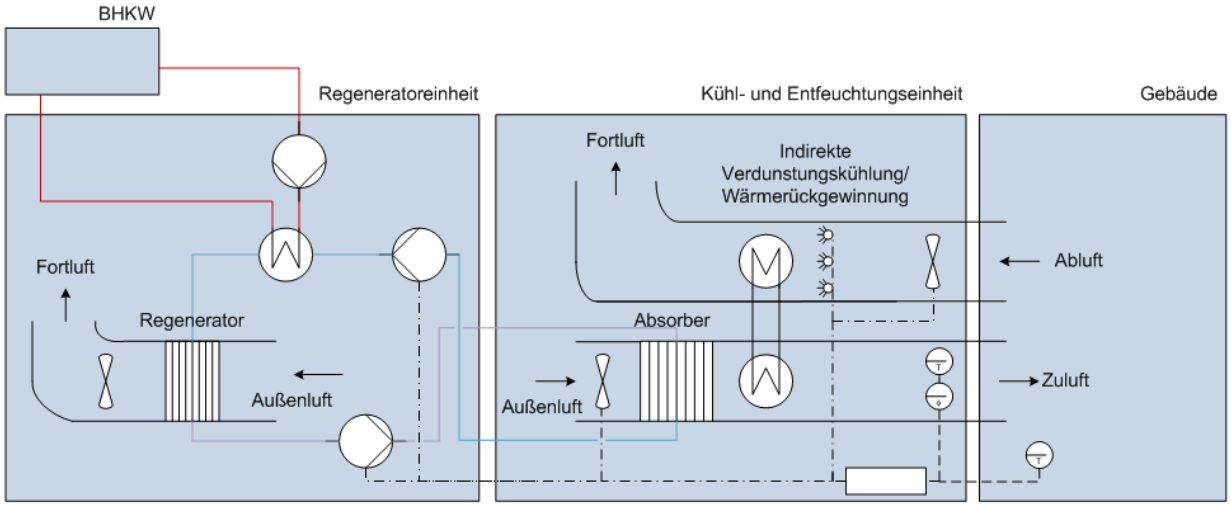


Tabelle 20: Wichtige Systemparameter des DEC-Systems

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Nennkühlleistung, adiabate Verdunstungskühlung[10]	$\dot{Q}_{0,ad,RLT}$	37,4	kW
Maximaler Zu-/Abluftvolumenstrom	$\dot{V}_{ZU/AB,RLT}$	8300	m³/h
Maximaler Regenerationsluftvolumenstrom	$\dot{V}_{Reg,RLT}$	2800	m³/h
Vor-/Rücklauftemperaturen BHKW-Heißwasser	$t_{VL/RL,BHKW}$	70 / 60	°C

7.3.2 Modellierung

7.3.2.1 Gebäudemodell

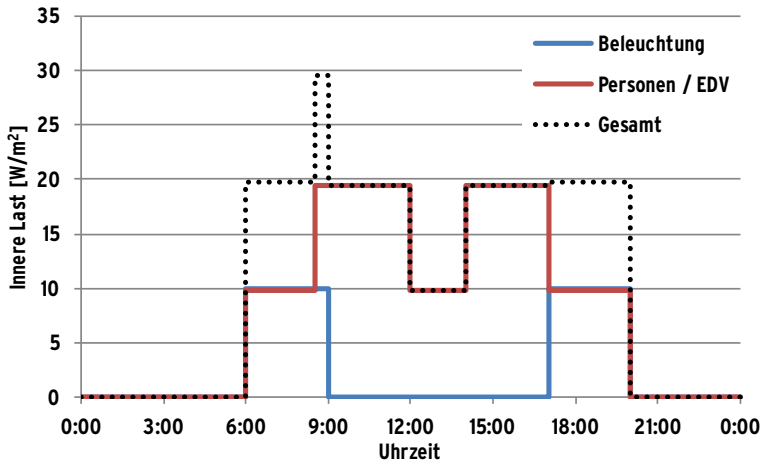
Für den Vergleich der verschiedenen Systeme zur Gebäudeklimatisierung wird ein Bürogebäude mit quadratischer Grundfläche von 400 m² angenommen. Im Gebäude wird

[10] Abluft-Bedingungen: 24°C, 45 % r.F., Außenluft-Bedingungen: 32 °C, 40 % r.F., Entfeuchtung der Zuluft auf 11 g_{Wasser}/kg_{Luft}, bei maximalen Zu-/Abluftvolumenströmen (Herstellerangaben: Menerga (Menerga, 2010) und eigenen Berechnungen)

repräsentativ nur eine Etage betrachtet. Die Fläche der Etage besitzt keine weiteren Unterteilungen, sodass ein Ein-Zonen-Modell vorliegt. Eine Aufteilung nach Himmelsrichtungen (verschiedene Solareinträge) ist somit nicht notwendig. Der Gesamtkältebedarf der Bürogebäudeetage wird erfasst und gedeckt. Die Außenwände sind nach den Haupthimmelsrichtungen ausgerichtet. Es wird eine gleichmäßige Verteilung der Fenster in der Außenfassade vorausgesetzt. Hierdurch soll ein ausgewogener Einfluss der Tages- und Jahreszeiten auf das Raumklima erreicht werden, um einen objektiven Vergleich der unterschiedlichen Kältesysteme zu ermöglichen.

Im Büro befinden sich 30 Arbeitsplätze, die an fünf Tagen in der Woche besetzt sind. Die inneren thermischen Lasten setzen sich aus der Wärmeabgabe durch anwesende Personen (129 W/Person), Beleuchtung (10 W/m^2) und betriebene EDV-Geräte (140 W/Arbeitsplatz) zusammen. Diese werden entsprechend der Raumbelegung angepasst (siehe Abbildung 73 und Tabelle 21). Der maximale spezifische Betrag der inneren Last beträgt 30 W/m^2. Über einen gesamten Arbeitstag (6 bis 20 Uhr) ergibt sich eine durchschnittliche innere Last von 19,6 W/m^2.

Abbildung 73: Verlauf der Inneren Lasten an einem Büroarbeitstag (Mo. – Fr.)



Zu den inneren thermischen Lasten tragen die EDV-Geräte maßgeblich bei. Vorgenommene Betrachtungen berücksichtigen pro Person einen Personal Computer inklusive Bildschirm mit einer Gesamtwärmeabgabe von 140 W. Drucker und Faxgeräte haben Leistungen von deutlich unter 5 W und sind damit vernachlässigbar. Eine Berücksichtigung von Rechenzentren und Servern ist in den oben genannten Zahlen nicht enthalten. Es kann ganzjährig von konstanten Lastbedingungen ausgegangen werden. Häufig wird ein separates Kältesystem bereitgestellt, welches für die spezifischen Anforderungen der Rechentechnik ausgelegt ist und entsprechend effizient arbeitet. Bei einigen hier betrachteten Systemen ist nicht sichergestellt, dass feste Lastanforderungen jederzeit bedient werden können (z.B. solare Kühlung mit AKM, DEC). Für diese Systeme ergäbe sich ohnehin die Notwendigkeit eines redundanten Kältesystems. Gleichzeitig ist es nicht in jedem Fall sinnvoll in der Übergangs- und Winterzeit ein zentrales Kältesystem für die Bereitstellung der relativ geringen Last des Rechenzentrums einzusetzen. Das Betreiben eines solchen Gerätes im unteren Teillastbereich kann deutliche Effizienzminderungen zur Folge haben (Wittig et al. 2012). Auf der anderen Seite könnte sich die Möglichkeit der Wärmeverschiebung - beispielsweise bei der Einbindung eines Rechenzentrums/Serverraumes in das dezentrale Multi-Split-System - effizienzsteigernd

auswirken. All diese Aspekte müssen für jeden Anwendungsfall und jedes Kältesystem individuell bewertet werden. Um eine Bevor- bzw. Benachteiligung einzelner Systeme durch das Einbeziehen eines Rechenzentrums oder Serverraumes zu vermeiden, wird dieses/dieser bei den durchgeführten Berechnungen generell nicht berücksichtigt.

Das Gebäudemodell wird mit „TRNBuild" – einer grafischen Benutzeroberfläche zur Definition eines Multizonengebäudemodells (Teil von TRNSYS) generiert. Details des Modells sind in Tabelle 21 aufgelistet.

Die bauphysikalischen Eigenschaften, das Nutzungsprofil sowie die äußeren klimatischen Einflüsse bedingen die am Gebäude auftretenden Wärmeströme. Für die betrachtete Büroetage ergeben sich die in Abbildung 74 aufgetragenen Werte in einer warmen Sommerwoche bei der Betrachtung zweier verschiedener Klimaszenarien (F_E, F_M). Solare Einstrahlung durch die Fensterflächen (direkt und diffus) und innere Lasten sind die wesentlichen Wärmequellen. Der Wärmeeintrag durch Lüftung, Infiltration und Wärmetransmission über Fensterflächen (ohne solare Strahlungskomponenten) und Außenwände ist von untergeordneter Bedeutung. Unter der Annahme gleicher Bürotemperaturen in den angrenzenden Etagen dienen Decke und Boden des Büros als ausgleichender Wärmespeicher (aufgenommene Wärme am Tag wird in den Nachtstunden in den Raum zurückgeführt). Ähnlich wirken die Außenwände, nur wird darüber deutlich mehr Wärme abgeführt als eingetragen. Ursache sind durchschnittliche Außentemperaturen (F_M: 20,0 °C; F_E: 23,5 °C), die unter der angestrebten maximalen Innentemperatur (24,0 °C) liegen.

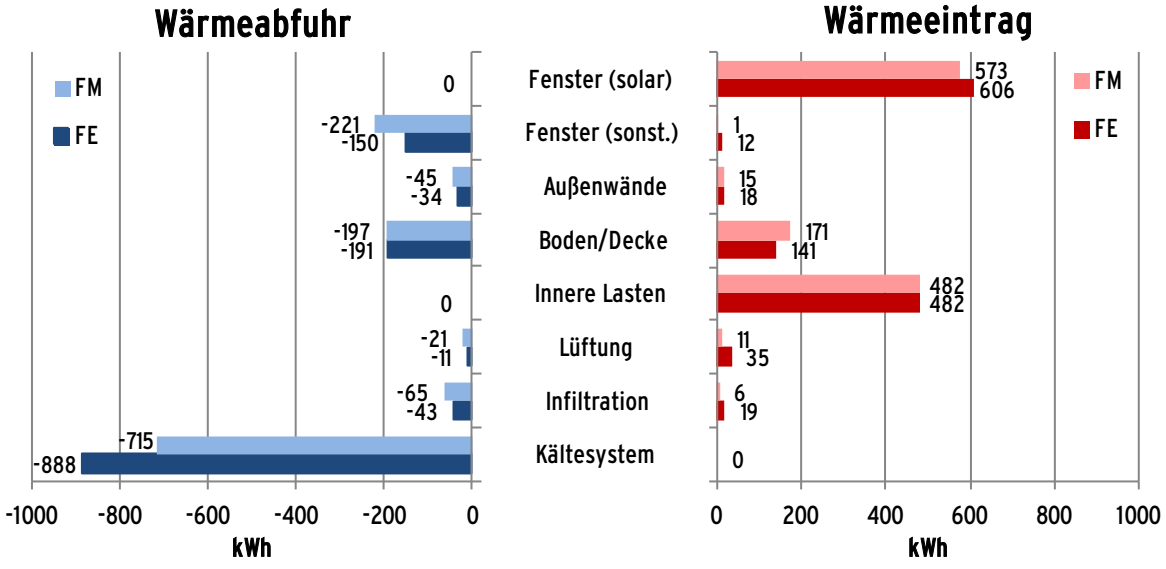
Tabelle 21: Wesentliche Parameter des Gebäudemodells

Parameter	Werte
Geometrie / Wände	
Grundfläche	20 x 20 m
Raumhöhe	2,8 m
Komplexität	1 Zone, 1 Etage
Außenwände	u-Wert = 0,28 (EnEV 2009) Aufbau: 10 cm Beton, 16 cm Steinwolle, Fassadenplatte
Fußboden / Decke	kein Wärmedurchgang (adiabat) Aufbau: 17,5 cm Beton
Fensterfläche	Fensteranteil 50 % u-Wert = 1,3 (EnEV 2009) g-Wert = 0,624 (EnEV 2009) äußerer Sonnenschutz: Verschattung 70% ab 200 W/m² Strahlungsdichte auf jeweilige Fensterfläche
Innere Lasten	
Wärmeabgabe	30 Personen, 120W / Person (bei 22°C) (VDI-2078 2003), 30 EDV-Einheiten, 140W / EDV-Einheit, 10W/m² Beleuchtung, → 30 W/m² Maximalwert, 19,6 W/m² Tagesdurchschnitt
Betriebszeit Personen / EDV	100 %: Mo. – Fr. 8:30 – 12:00 Uhr, 14:00 – 17:00 50 %: Mo. – Fr. 6:00 – 20:00 Uhr 0 %: sonstige Zeit
Betriebszeit Beleuchtung	100 %: Mo.-Fr. 6:00 – 9:00 Uhr und 17:00 – 20:00 Uhr 0 %: sonstige Zeit

Luftwechsel	
Infiltration	0,2 1/h: Mo. – So. 0:00 – 24:00 Uhr
Zwangsbelüftung	0,4 1/h: Mo. – Fr. 5:00 – 20:00 Uhr (inkl. Infiltration geforderte minimale Luftwechselrate für eine mittlere Raumluftqualität nach DIN EN 13779 Ausnahme: Bis zu 5,4 1/h bei DEC-System Wärmerückgewinnung bei Außentemperaturen unter 15 °C (Rückwärmzahl 0,8 für DEC-System (Menerga 2012), 0,5 für andere Systeme (DIN-V-18599 2007))
Kühlung	
Soll-Temperatur (Kühlen)	24 °C, bei Außentemperaturen bis 30 °C 6 K unterhalb der Außentemperatur, wenn Außentemperaturen über 30 °C
Betriebszeit	Mo. – Fr. 6:00 – 20:00 Uhr, bei Überschreitung der Soll-Temperatur (Kühlen)
Heizen	
Soll-Temperatur (Heizen)	20 °C: Mo. – Fr. 5:00 – 20:00 Uhr 18 °C: sonstige Zeit
Betriebszeit	Ganzwöchig, bei Unterschreitung der gültigen Soll-Temperatur (Heizen)

Die Übersicht macht auch deutlich, dass die Fensterflächen neben dem erwähnten Wärmeeintrag durch solare Einstrahlung einen großen Anteil zur Wärmeabfuhr beitragen. Bei dem Klima F_M sorgen Lüftung und Infiltration für eine relativ hohe Wärmeabfuhr bei gleichzeitigem geringen Wärmeeintrag. Auch dies lässt sich mit durchschnittlichen Außentemperaturen deutlich unter den maximal zulässigen Raumtemperaturen begründen. Während eines extremen Sommers (F_E) tragen Gebäudekomponenten, deren transportierte Wärmeströme stark von den Außentemperaturen abhängig sind (Fenster, Außenwände, Lüftung, Infiltration), einen geringeren Anteil zur Wärmeabfuhr und einen erhöhten Anteil zum Wärmeeintrag bei.

Abbildung 74: Aufschlüsselung der akkumulierten Wärmeströme (betrachtete Büroetage für eine warme Sommerwoche, FM)



Aus den Wärmestrombetrachtungen geht hervor, dass unter den definierten Gebäudeeigenschaften und dem Nutzungsprofil ein erheblicher Anteil der Wärmeabfuhr durch ein Kältesystem zu realisieren ist. Mit den nachfolgenden Betrachtungen soll ermittelt

werden, wie diese Wärmeabfuhr von den oben definierten Kältesystemen unter Berücksichtigung von Klimaschutz-, Kosten- und Behaglichkeitsaspekten bewältigt werden kann.

7.3.2.2 Kältesysteme

Die Vorgehensweise und Annahmen zur Modellierung der Kältesysteme sind in Tabelle 22 zusammengefasst aufgeführt. Weitere Details zu den einzelnen Kältesystemen sind im Anhang in tabellarischer Form ergänzt.

Tabelle 22: Vorgehensweise und Annahmen bei der Modellierung der Kältesysteme

Modellierung	Werte / Annahmen
Kältekreisläufe	
Grundlagen	• Die einzelnen Komponenten eines Kältekreislaufes (Verdichter, Verflüssiger, Verdampfer, Expansionsorgan) werden in die Modellierung mit einbezogen. • Die jeweiligen Punkte eines Kältekreislaufprozesses errechnen sich für entsprechende Kältemittel mit Hilfe von Stoffdatenbaken • Randbedingungen, wie Temperaturen und Drücke, sowie Wärmeströme ergeben sich aus der Kühlaufgabe und Modellannahmen (s.u.)
Verdichter	• Annahme Gesamtwirkungsgrad: 0,7 • Elektrische Leistung berechnet aus technischer Arbeit nach Carnot-Prozess zzgl. der Verluste entsprechend dem Gesamtwirkungsgrad des Verdichters • Einstufige Verdichtung (Ausnahme bei Kältemittel R718, hier zweistufig)
Verflüssiger	• Fest vorgegebene minimale Temperaturdifferenz im Gegenstrom-Wärmeübertrager zwischen Kühlluft und Kältemittel • Unterkühlung des Kältemittels: 5 K
Verdampfer	• Fest vorgegebene minimale Temperaturdifferenz im Wärmeübertrager zwischen Kältemittel und Kälteträger / Raumluft
Expansionsorgan	• Als Verlustfrei angenommen • Keine Regelungseinschränkungen (alle Druckverhältnisse einstellbar)
Absorptionskältemaschine	
Grundlagen	• Die Absorptionskältemaschine wird nach dem Modell der charakteristischen Gleichung beschrieben (Heinrich 2004) • Die Koeffizienten basieren auf einer Auswertung von kleinen H2O/LiBr-AKMs im (Wiemken, Elias, Nienborg, et al. 2012)
Solarkollektorfeld	• 1-Knoten-Modell • Koeffizienten basieren auf der Auswertung einer großen Anzahl von Flachkollektoren und geben den Stand der Technik wieder
Zustandsänderungen der Luft	
Grundlagen	• Luftzustandsänderungen werden auf Grundlage des im Mollier-h-x-Diagramm dargestellten Zusammenhanges berechnet (mit Hilfsprogrammen)
Ventilatoren / Hydraulikpumpen	
Ventilatoren	• Elektrische Ventilatorleistung im Teillastbetrieb (TL) aus vereinfachten Zusammenhang zwischen Volumenstrom (VLuft) und elektrischer Leistung (Pel) ermittelt (Menerga 2012): $\left(\frac{\dot{V}_{Luft,TL}}{\dot{V}_{Luft,Nenn}}\right)^{1,78} = \left(\frac{P_{el,TL}}{P_{el,Nenn}}\right)$ Einflüsse des Volumenstromes auf Strömungswiderstände und Wirkungsgrad überschlägig berücksichtigt

Hydraulikpumpen	• Pumpenwirkungsgrad: 0.8, Motorwirkungsgrad: 0.75 (gut ausgelegte Trockenläuferpumpe (Oraschewski et al. 2007)) • Elektrische Pumpenleistung mit dem für die Ventilatorleistung definierten Zusammenhang zwischen Volumenstrom und elektrischer Leistung berechnet
Kühldecken	
	• Begrenzung der Vorlauftemperatur auf Raumluft-Feuchte-Zustand • Anpassung des Kaltwassermassenstroms auf Kühlleistungsbedarf
Bilanzierung	
Energiebedarf	• Alle elektrischen Komponenten werden bei der Bilanzierung des jährlichen Endenergieverbrauches einbezogen, wenn nicht explizit ausgeschlossen • Elektronische Komponenten (z.B. Regelungselektronik) und diverse elektrische Komponenten (z.B. elektronisches Expansionsventil) wurden nicht mit bilanziert, da Systemabhängig und für einen relativen Systemvergleich weniger von Bedeutung

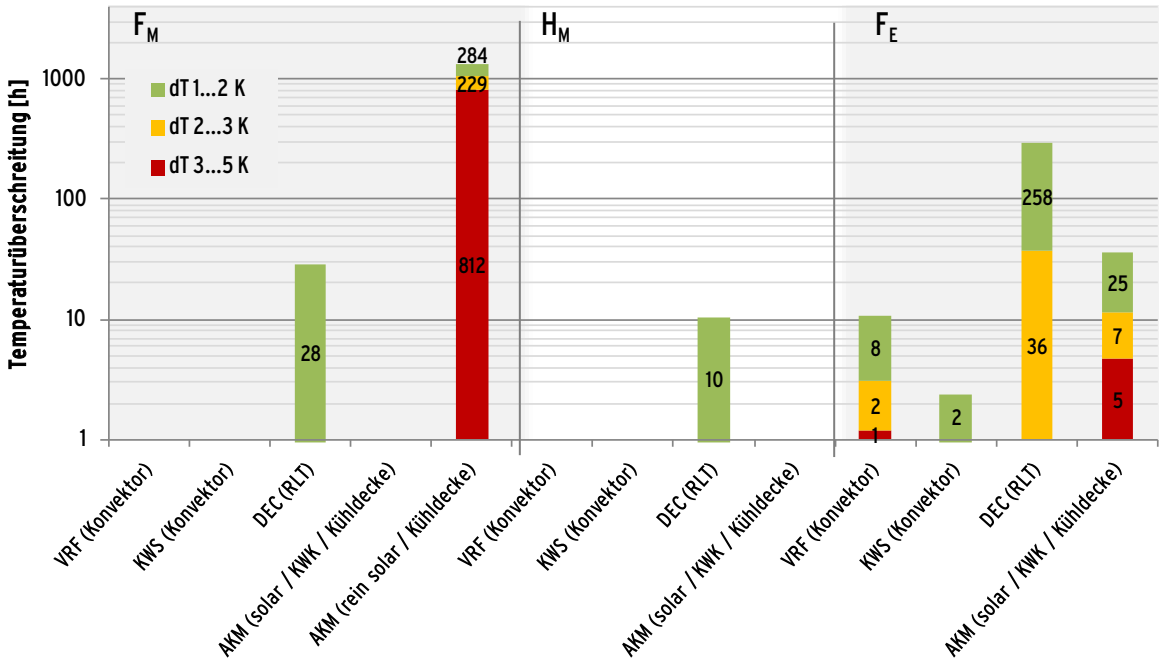
7.3.3 Ergebnisse

7.3.3.1 Behaglichkeit

Der Einsatz eines Kältesystems zur Gebäudeklimatisierung ist dort angebracht, wo ohne ein solches System Werte für Temperatur und Luftfeuchtigkeit auftreten würden, welche für den Menschen zu hoch sind, d.h. als unbehaglich empfunden werden. Bei einem Vergleich verschiedener Kältesysteme – sei es im Hinblick auf energetische Effizienz oder Umweltverträglichkeit – ist daher auch die Einhaltung bestimmter Behaglichkeitsgrenzen zu betrachten.

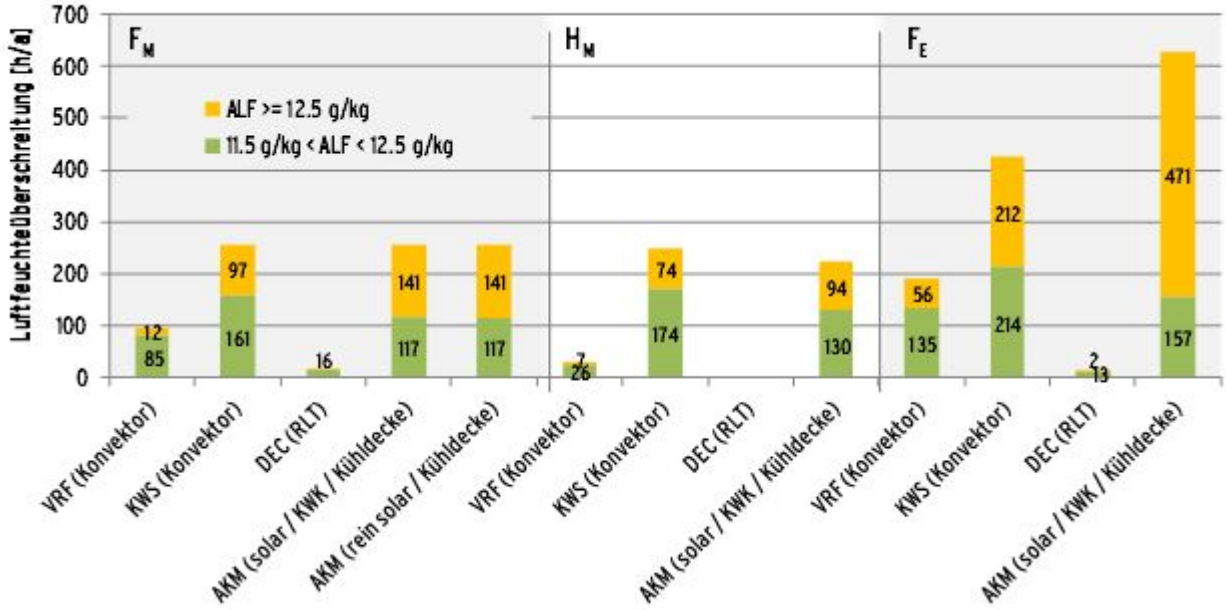
In den folgenden Diagrammen wird für die einzelnen Kältesysteme dargestellt, in welchem Zeitraum und in welcher Größe die zulässigen Raumtemperaturen überschritten werden. Dabei wird das Auftreten einer Differenz zum Soll-Wert (24 °C) größer +1 K als Überschreitung gewertet. Werte zwischen 0 K und +1 K werden nicht als Überschreitung interpretiert, da eine geringfügige Abweichung vom Soll-Wert weder in der Simulation noch in der Praxis mit einem vertretbaren Aufwand regelungstechnisch unterbunden werden kann. Bei der Luftfeuchtigkeit gelten Werte von über 11,5 g Wasser/kg Luft als Überschreitung (in Anlehnung an den in der DIN 1946-2 definierten Bereich der „Thermischen Behaglichkeit“). Für die Überschreitungshäufigkeit der Soll-Raumtemperaturen und der Raumluftfeuchte ergibt sich folgendes Bild:

Abbildung 75: Überschreitungshäufigkeit der Soll-Raumtemperatur für die verschiedenen Kältesysteme und klimatische Bedingungen (KWK – Kraft-Wärme-Kopplung / Fernwärmeunterstützung)



- Bei VRF- und Kaltwassersatzsystemen sind die Zeiten und Größe der Temperatur-Überschreitungen gering (Grund: Ausreichend Kälteleistung, geringer Luftwechsel und damit geringe Zufuhr sensibler und latenter Lasten mit der Außenluft)
- DEC-Systeme weisen deutlich mehr Überschreitungsstunden auf (Grund: relativ hohe Zulufttemperatur teilweise nicht ausreichend für Kältebedarf (besonders F_E) → Luftvolumenstrom müsste noch höher sein, insbesondere für Klima F_E → noch höherer Energiebedarf)
- Bei rein solargetriebene Absorptionskältemaschinen (ohne Backup der Wärmeversorgung und ohne große thermische Speicher) tritt eine häufige und hohe Überschreitung der zulässigen Raumlufttemperatur auf. Eine Aufstockung der Kollektorfläche sowie die Verteilung auf verschiedene Himmelsrichtungen zum Erzielen hoher Erträge in den späten Nachmittagsstunden, führen nur zu geringen Verbesserungen.
- Bei sehr hohen Umgebungstemperaturen mit hoher relativer Luftfeuchte treten bei Verwendung einer Kühldecke unabhängig vom Kältesystem Raumlufttemperaturüberschreitung auf. Ursache ist die der Taupunkttemperatur geschuldete minimale Oberflächentemperatur der Kühldecken und die damit verbundene Begrenzung der Kühlleistung. Bei einer weiteren Absenkung der Vorlauftemperatur wäre Kondensation der Raumluftfeuchte an der Kühldecke die Folge.

Abbildung 76: Überschreitungshäufigkeit der absoluten Luftfeuchtigkeit (ALF) von 11,5 g/kg für die verschiedenen Kältesysteme und Klimaszenarien (KWK – Kraft-Wärme-Kopplung / Fernwärmeunterstützung)



- Mit VRF- und Kaltwassersatzsystemen gibt es keine geregelte Entfeuchtung. Das VRF-System entfeuchtet durch Direktverdampfung (6 °C Verdampfungstemperatur am Konvektor) die Raumluft stärker als das KWS-System, welches mit höheren Vorlauftemperaturen (Konvektortemperaturen von ≥ 10 °C) betrieben wird.
- Die geregelte Entfeuchtung durch die RLT-Anlage mit DEC-System führt zu einer geringen Überschreitungshäufigkeit.
- Bei Systemen mit Kühldecken kann die Raumluft nicht entfeuchtet werden (hohe Vorlauftemperaturen zum Vermeiden von Tauwasserbildung an der Decke). Deswegen treten hier häufig Überschreitungen der Luftfeuchte auf.

Die besten Ergebnisse aller untersuchten Systeme hinsichtlich der Behaglichkeit erzielen VRF-Systeme und Kaltwassersysteme mit Luft-Konvektoren. Systeme mit Kühldecken sind besonders in feuchten und warmen Sommern nicht in der Lage eine ausreichende Kühlleistung bei gleichzeitiger Unterbindung von Kondensation zu erreichen. Eine Feuchtekontrolle ist mit Kühldecken nicht möglich. DEC-Systeme sind im Hinblick auf die Be- und Entfeuchtung positiv zu bewerten, durch die begrenzte Zulufttemperatur jedoch hinsichtlich der Kühlleistung beschränkt.

Optimal hinsichtlich Behaglichkeit sind Systemkombinationen mit der Trennung von Kühlung und Entfeuchtung. Wird die Entfeuchtung über ein sorptives DEC-Verfahren, die Kühlung jedoch über Kühldecken oder Betonkernaktivierung realisiert, lassen sich mit geringen Luftgeschwindigkeiten behagliche Zustände im Raum erreichen.

7.3.3.2 Energiebedarf

Das Multi-Split-VRF-System mit Konvektoren hat unter den Kompressionskältesystemen den höchsten Elektroenergiebedarf. Zum einen ist dies bedingt durch eine im Vergleich zu den anderen Systemen niedrigere Verdampfungstemperatur und die damit verbundene erhöhte

Verdichterleistung. Eine niedrigere Verdampfungstemperatur führt darüber hinaus zu einer höheren Entfeuchtungsleistung (siehe Abbildung 79). Diese latente Abkühlung trägt nicht zur Reduzierung der Raumtemperatur bei, erhöht aber den Energiebedarf. Zum anderen kann bei diesen Systemen ein starker Abfall der Leistungszahl im Teillastbereich ab ca. 40 % der Nennkälteleistung auftreten (DIN-V-18599 2007). Die Anlage wird unter den berücksichtigten Bedingungen bis zu 85 % der Betriebszeiten innerhalb dieses Leistungsbereiches betrieben.

Wie beispielhaft für das Klima F_M in den Diagrammen in Abbildung 77 und Abbildung 78 dargestellt ist, kann die Erweiterung eines KWS-Systems durch einen Kaltwasserspeicher eine Verringerung des elektrischen Energiebedarfes um 10 % bzw. 12 % bewirken. Diese Werte resultieren aus den Berechnungen, denen ausschließlich eine Optimierung der Speichergröße zugrunde liegt. Durch Optimierung der Regelungsstrategie, Form und Wärmedämmung des Speichers können noch höhere Werte erreicht werden. Weiterhin führt der Einsatz einer Kühldecke zur Kälteübergabe ebenfalls zu einer signifikanten Reduzierung des Endenergiebedarfes (27 % für das Klima F_E). Ursache dafür sind die höhere Kaltwasservorlauftemperatur (14 °C statt 10 °C) sowie die Einsparung elektrischer Energie durch eine Wärmeübergabe mit Hilfe freier Konvektion und damit ohne Ventilator. Darüber hinaus wird bei dem Einsatz von Kühldecken eine Luftentfeuchtung generell vermieden, sodass keine latenten Kältelasten vom Kältesystem abgeführt werden müssen.

Die RLT-Anlage mit DEC-System weist den höchsten elektrischen Energiebedarf auf. Die Abkühlung der Zuluft ist durch das adiabate Kühlprinzip begrenzt. Hieraus resultiert die Notwendigkeit hoher Luftwechselraten zur Deckung des gesamten Kühlbedarfs. Neben dem hohen Elektroenergiebedarf erfordert die Entfeuchtung der Luft einen zusätzlichen thermischen Energiebedarf. Aufgrund der relativ hohen Luftfeuchtigkeitswerte im Klima F_E ist hier ein besonders hoher thermischer Energieaufwand erforderlich um eine geringe Überschreitungsdauer der Luftfeuchtigkeit zu erreichen (siehe Abbildung 79). Eine hohe Rückwärmzahl (0,8) des DEC-Systems trägt zur erheblichen Reduzierung des Heizenergiebedarfs bei (ca. 17% im Vergleich zu den anderen untersuchten Systemen, für die der erforderliche Luftwechsel (nur Lüftungsbedarf, nicht Infiltration) mit einer Rückwärmzahl von 0,5 berechnet wurde).

Abbildung 77: Endenergiebedarf berechneter Kältesysteme im Bereich Gebäudeklimatisierung – Zusammenstellung (KWK – Kraft-Wärme-Kopplung / Fernwärmeunterstützung)

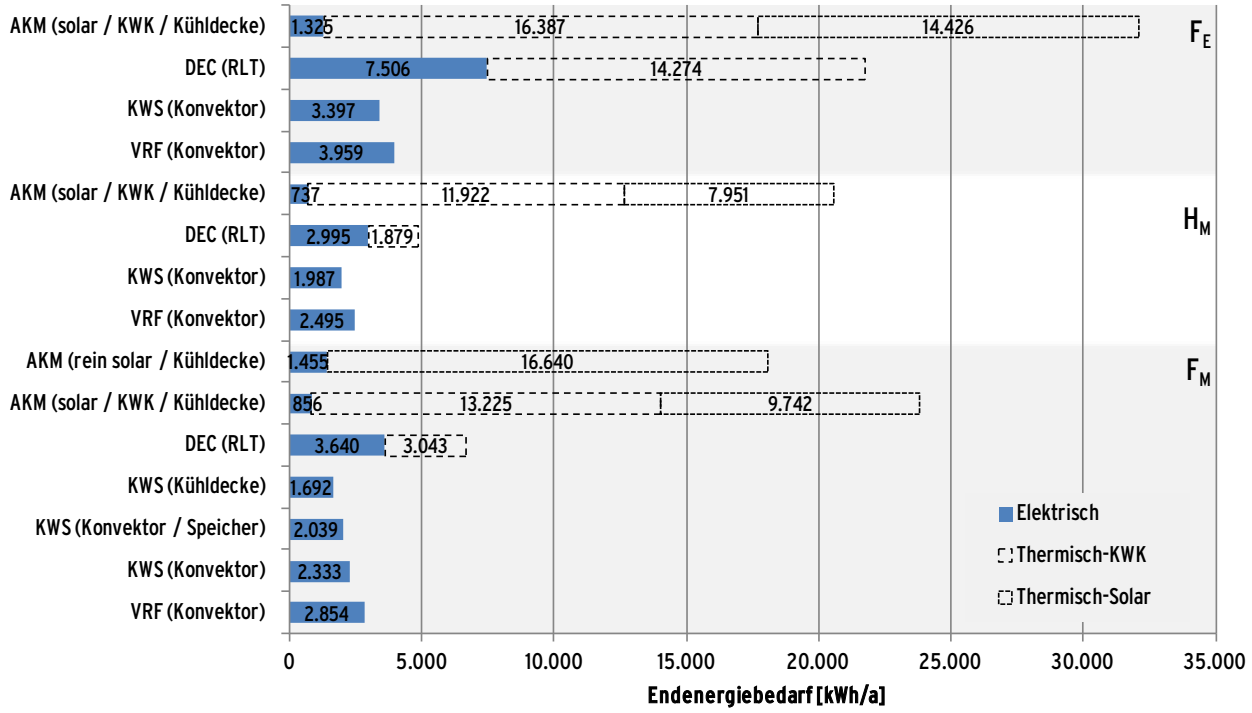


Abbildung 78: Primärenergiebedarf – Zusammenstellung (KWK – Kraft-Wärme-Kopplung / Fernwärmeunterstützung, Sp – inkl. Kaltwasserspeicher)

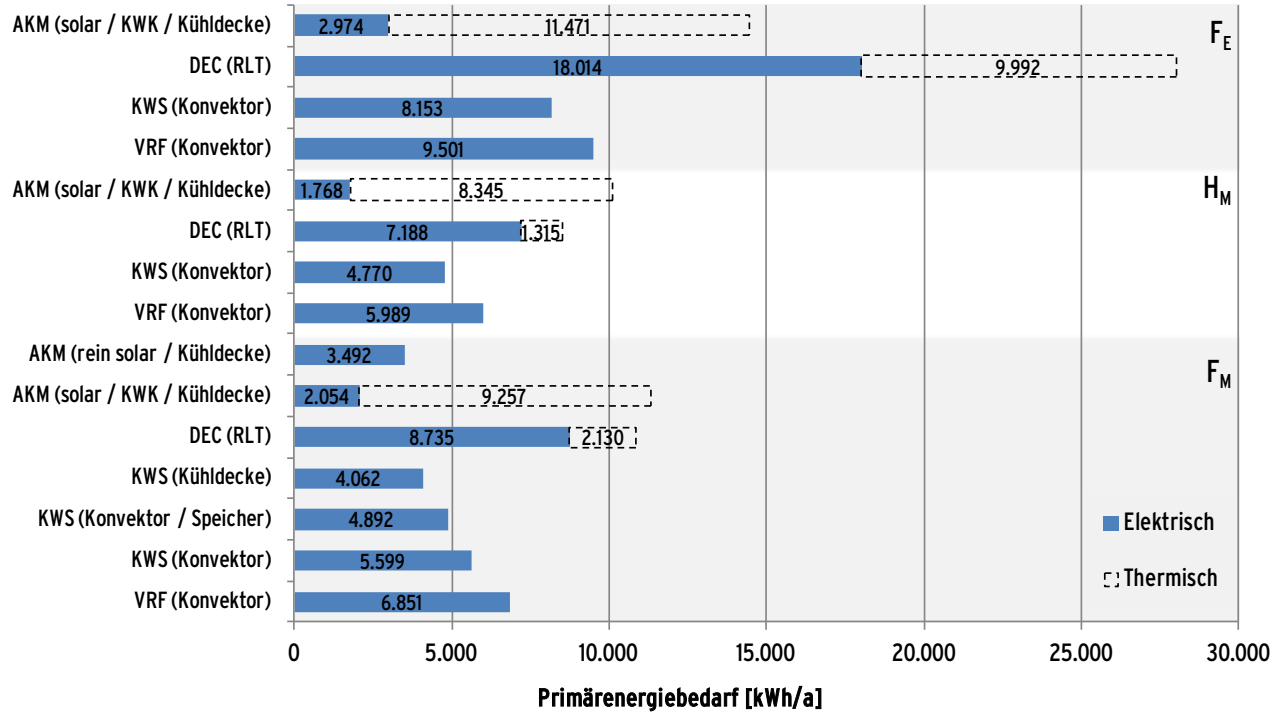
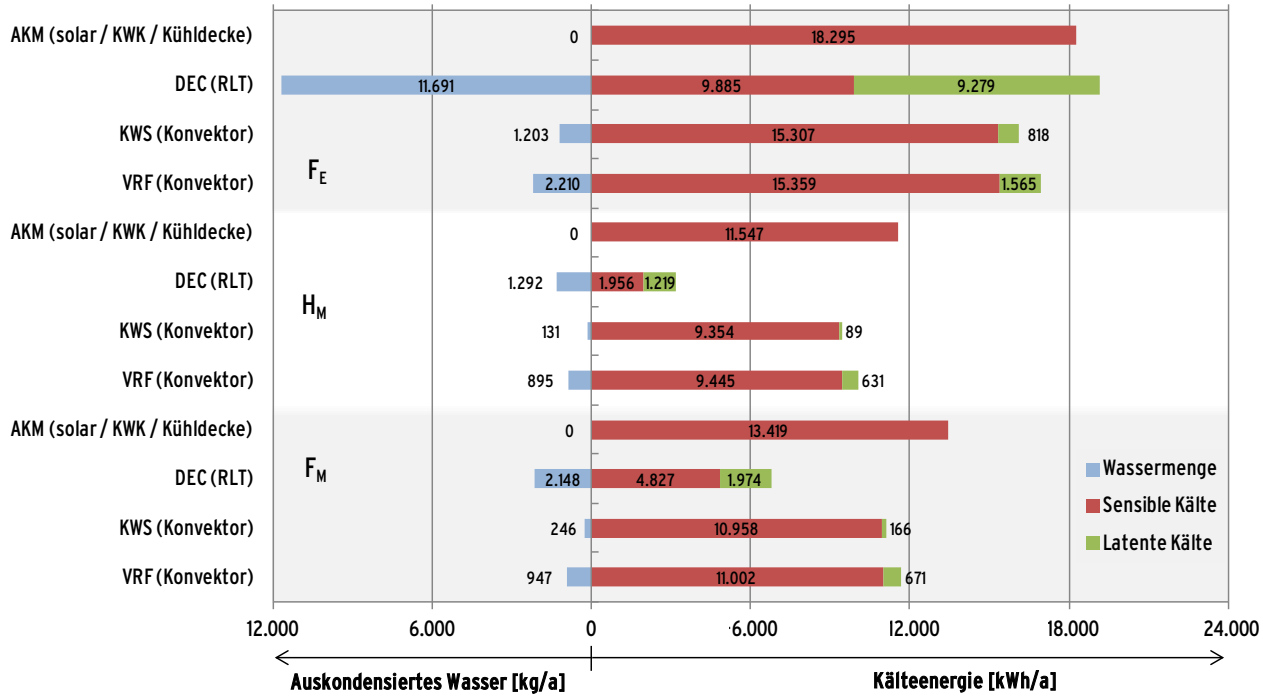
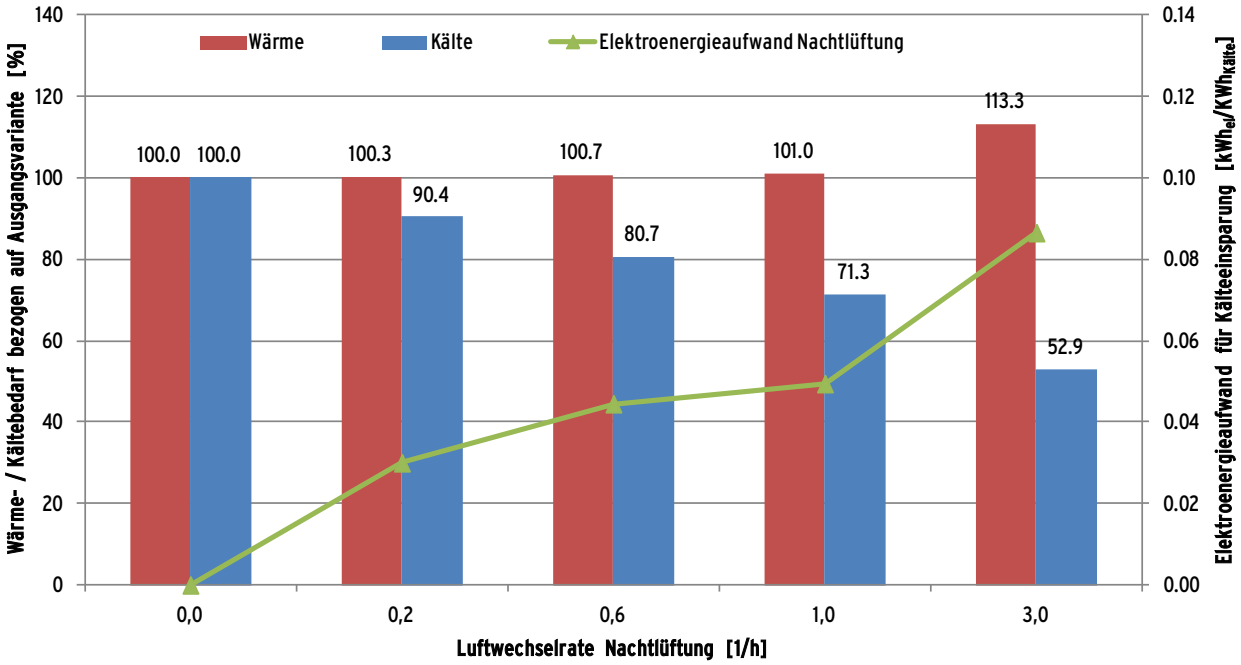


Abbildung 79: Auskondensierte Wassermenge sowie zur latenten und sensiblen Abkühlung eingesetzter Kälte für die verschiedenen Systemvarianten und Klimazonen



Unabhängig von der Wahl des Systems zur Kältebereitstellung ist ein weiteres Energieeinsparpotenzial durch die Realisierung einer geregelten Nachtlüftung nutzbar. Die Außenluft weist nachts i.d.R. deutlich niedrigere Temperaturen als die Gebäudeinnenluft auf, so dass durch nächtliche Lüftung Gebäudewärme nach außen abgeführt werden kann. In Abbildung 80 sind die Ergebnisse einer Beispielrechnung für das Klima F_E dargestellt. Bei moderaten Luftwechselraten von 1,0 h^{-1} verringert sich der Kältebedarf bereits um ca. 30 %, ohne dass einen nennenswerten Anstieg des Heizbedarfes zu verzeichnen ist. Mit höheren Luftwechselraten lässt sich der Kältebedarf weiter reduzieren, nur steigt dann der Heizbedarf deutlich. In Abhängigkeit des Verhältnisses zwischen spezifischen Primärenergieaufwand für Heizen und Kühlen kann sich ein energetischer Nachteil durch eine sehr intensive Nachtlüftung ergeben. Darüber hinaus muss der Energieaufwand für die Durchführung der gewünschten Luftwechsel berücksichtigt werden. Hierbei sind Varianten mit sehr niedrigem Elektroenergieaufwand denkbar (z.B. geregelte Fensterlüftung). Bei Vorhandensein einer RLT-Anlage können nötige Luftwechselraten mit relativ geringem Aufwand umgesetzt werden – setzt man diese mit dem Einsparpotenzial ins Verhältnis (siehe auch Abbildung 80).

Abbildung 80: Nutzen und Aufwand einer gezielten Belüftung des Gebäudes bei Nacht (FE).



Die Nachtlüftung ist nur dann aktiv, wenn die Außentemperatur über 10°C und unterhalb der Gebäude-Innentemperatur liegt, sowie die Bürotemperatur einen Wert von 20°C nicht unterschreitet. Der Elektroenergieaufwand ist mit der nötigen Ventilatorleistung aus der DIN V 18599-7 berechnet und entfällt nahezu bei einer effektiven und geregelten Fensterlüftung.

7.3.3.3 TEWI-Berechnungen

Die TEWI-Werte hängen von den Parametern Kältemittelleckrate und spezifische CO_2-Emissionen der Strom- bzw. Wärmebereitstellung ab. Neben der Abbildung 81 folgen weitere Grafiken zum Einfluss dieser Parameter bezogen auf die Anlagentechnik in Kapitel 7.3.4.

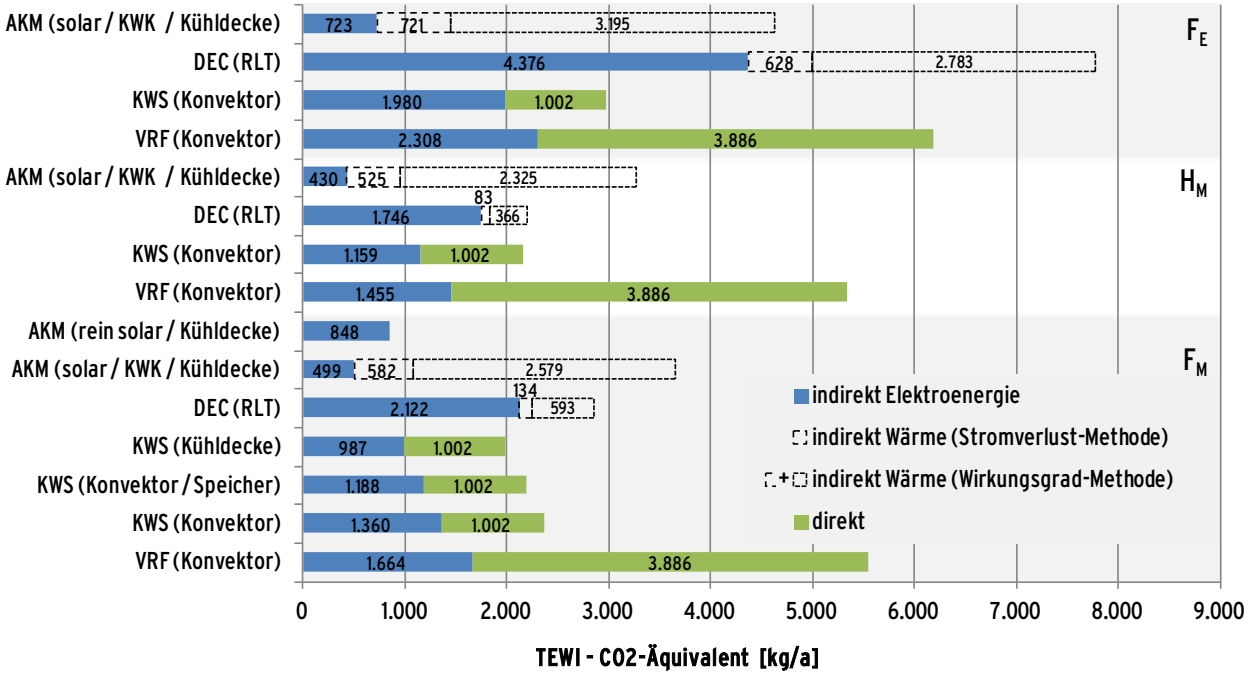
Abbildung 81 liefert einen Überblick über die direkten und indirekten TEWI-Werte der einzelnen Anlagensysteme. Mit Werten zwischen 850 kg CO_2-Äquivalent/a bei AKM- (rein solar) und 5.000 kg CO_2-Äquivalent/a bei DEC–Systemen[11] werden bereits bei den Ergebnissen für das Klima F_E große Unterschiede erkennbar. Zu beachten ist, dass die Systeme die Behaglichkeitskriterien dabei unterschiedlich gut erfüllen.

Zur vollständigen Bewertung des Einflusses einer Kälteanlage auf das Klima müssten zusätzlich zur TEWI-Betrachtung die CO_2-Emissionen für die Herstellung berücksichtigt werden. Das gilt insbesondere bei Klimasystemen mit geringer Vollbenutzungsstundenzahl. Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde diese Untersuchung jedoch nicht durchgeführt.

Die geringsten TEWI-Werte weisen die Varianten mit Absorptionskälteanlagen und mit Kaltwassersätzen auf. Die direkten TEWI-Anteile bei VRF-Systemen übertreffen den verbrauchsbedingten indirekten Anteil nahezu um den Faktor 2.

[11] unter Anwendung der Stromverlust-Methode zur Bewertung der Wärme

Abbildung 81: TEWI-Betrachtung für verschiedene Kälte-Systeme – Unterteilung in direkte und indirekte TEWI-Anteile (die verschiedenen Allokationsmethoden für die Bewertung der Wärme sind in Abschnitt 4.2.10 (ab S. 59) aufgeführt)



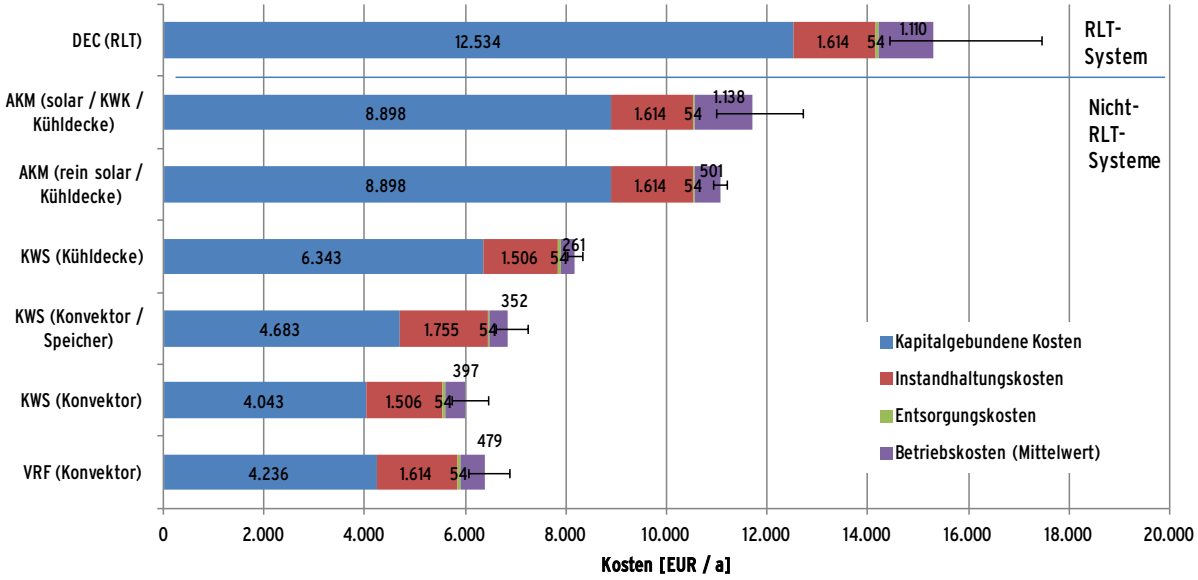
7.3.3.4 Kosten Kältesysteme

Die Gegenüberstellung der Gesamtkosten untersuchter Kältesysteme für den Anwendungsbereich Büroklimatisierung liefert ein weites Spektrum (siehe Abbildung 82). Wirtschaftlich betrachtet schneiden die Systeme mit Kompressionskälte für den betrachteten Anwendungsfall deutlich günstiger ab als die damit verglichenen Systeme. Das AKM-System verursacht über 50 % und das DEC-System über 130 % Mehrkosten im Vergleich zu den klassischen Kältesystemen. Den größten Einfluss haben hier die Investitionskosten bzw. die kapitalgebundenen Kosten. Diese übersteigen sowohl für das AKM-System, als auch für das DEC-System bereits die Gesamtkosten der Kompressionskälte-Systeme. Die Betriebskosten tragen nur zu einem relativ geringfügigen Teil zu den Gesamtkosten bei. Selbst eine Betrachtung denkbarer Kostenvariationen aufgrund verschiedener Betriebskosten-Szenarien verändert dieses Verhältnis nicht wesentlich. Hauptursache für das erhaltene Ergebnis ist die geringe Anzahl an Vollbenutzungsstunden. Für alle Kältesysteme und betrachteten Klimaregionen liegt diese unter 800 h, was einem Anlagennutzungsgrad kleiner 10 % entspricht. Instandhaltungs- und Entsorgungskosten unterscheiden sich nicht wesentlich für die verschiedenen Kältesysteme und spielen daher bei einem Kostenvergleich keine ausschlaggebende Rolle.

Bei einem Vergleich der beiden Kompressionskältesysteme ergeben sich relativ geringe Unterschiede. Dennoch weist das KWS-System ohne Speicher leichte Kostenvorteile gegenüber dem VRF-System auf (ca. 7 %). Das lässt sich zum einem mit geringeren Investitionskosten bei dem Kälteerzeuger (siehe Abbildung 83) als auch mit leicht geringeren Betriebskosten begründen. Die Erweiterung des KWS-Systems um einen Kaltwasserspeicher ergibt deutlich energetische Vorteile (Betriebskosten können im Durchschnitt um ca. 10 % reduziert werden). Gleichzeitig erhöhen sich jedoch die Investitions- und Instandhaltungskosten, sodass sich aus der Integration eines Kaltwasserspeichers in der Gesamtkostenbetrachtung ein wirtschaftlicher Nachteil ergibt. Werden die Umluftkonvektoren durch eine Kühldecke ersetzt, verringern sich zwar die Betriebskosten signifikant (um ca. 27 %), die Investitionskosten fallen jedoch deutlich

höher aus (ca. 60 % größer), sodass die Gesamtkosten nicht reduziert werden können. Bei den höheren Investitionskosten von Multi-Split-VRF-Systemen sind die zusätzlich möglichen Betriebsmodi des Heizens (bei 3-Leiter-Systemen auch der Parallelbetrieb[12]) zu berücksichtigen.

Abbildung 82: Jahresgesamtkosten untersuchter Kältesysteme für den Bereich Gebäudeklimatisierung – Für die Betriebskosten ist jeweils ein Mittelwert für alle Energiekosten- und Klimaszenarien angegeben. Das Spektrum der Betriebskosten - generiert durch die Betrachtung verschiedener Kostenszenarien – wir durch die Fehlerbalken ersichtlich.

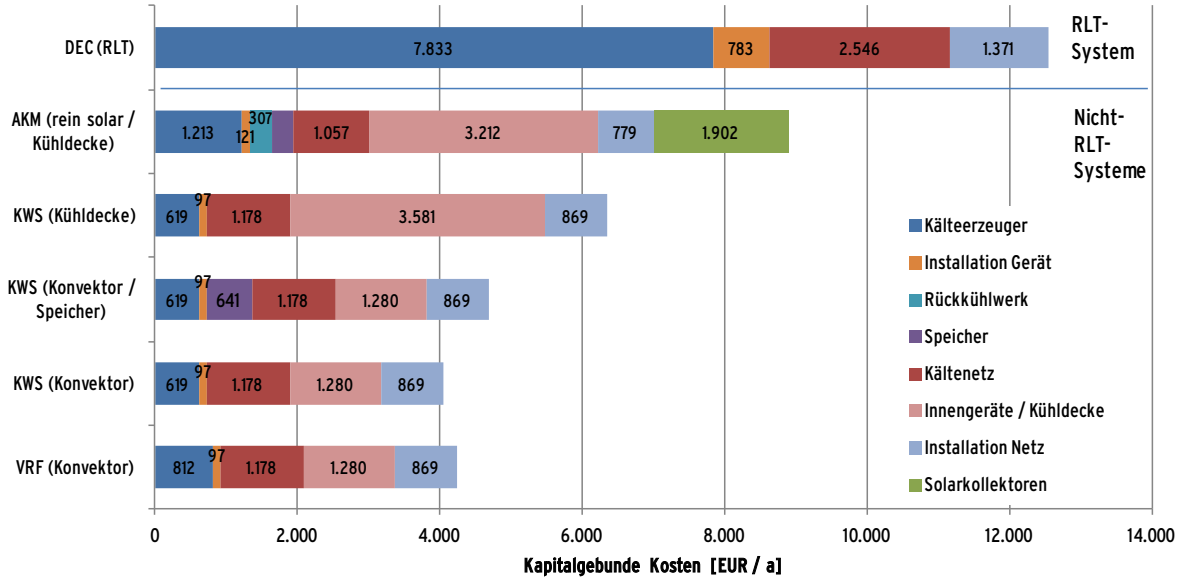


In Abbildung 83 ist eine Aufschlüsselung der Investitionskosten dargestellt. Hier ist erkennbar, dass für Kompressionskälteanlagen die Kosten für das Kältenetz und die Innengeräte bestimmend sind, wohingegen die Kosten für den Kälteerzeuger eine untergeordnete Rolle spielen. Bei dem AKM-System sind Kälteerzeugerkosten inkl. Rückkühler deutlich höher (der Rückkühler ist bei den VRF- und KWS-Systemen bereits im Kälteerzeuger integriert). Die Verwendung von Solarkollektoren führt darüber hinaus zu einer deutlichen Kostenerhöhung, wodurch sich der große Unterschied zu den klassischen Kältesystemen ergibt. Die Abbildung zeigt auch, dass das DEC-System aufgrund der hohen Kosten für den Kälteerzeuger vergleichbar hohe Investitionskosten erforderlich macht. Mit einer adiabaten Verdunstungskühlung ist die Zulufttemperatur nach unten begrenzt (Feuchtkugeltemperatur). Zur Deckung des Kältebedarfes sind dadurch hohe Volumenströme nötig. Das hat zur Folge, dass das System groß dimensioniert werden muss und entsprechend hohe Kosten nach sich zieht. An dieser Stelle muss noch einmal darauf hingewiesen werden, dass das DEC-System als RLT-Gerät in diesem Vergleich ohnehin eine Sonderstellung einnimmt. Im Gegensatz zu den damit verglichenen Systemen kann hiermit ein permanenter Austausch der Raumluft realisiert werden. In Verbindung mit einer gezielten Entfeuchtung liefert das System eine deutlich höhere Raumluftqualität. Eine im Gerät integrierte, effiziente Wärmerückgewinnung führt

[12] Der parallele Kühl- und Heizbetrieb von einzelnen, am gleichen Außengerät angeschlossenen Innengeräten ist möglich und führt zur Entlastung des Wärmeübertragers der Außeneinheit. Dies ist insbesondere bei Einbindung von Serverräumen interessant, die oft bis in die Heizperiode hinein maschinell gekühlt werden müssen.

auch in der Heizperiode zu energetischen Vorteilen, was im Rahmen dieser Studie allerdings nicht genauer betrachtet werden kann.

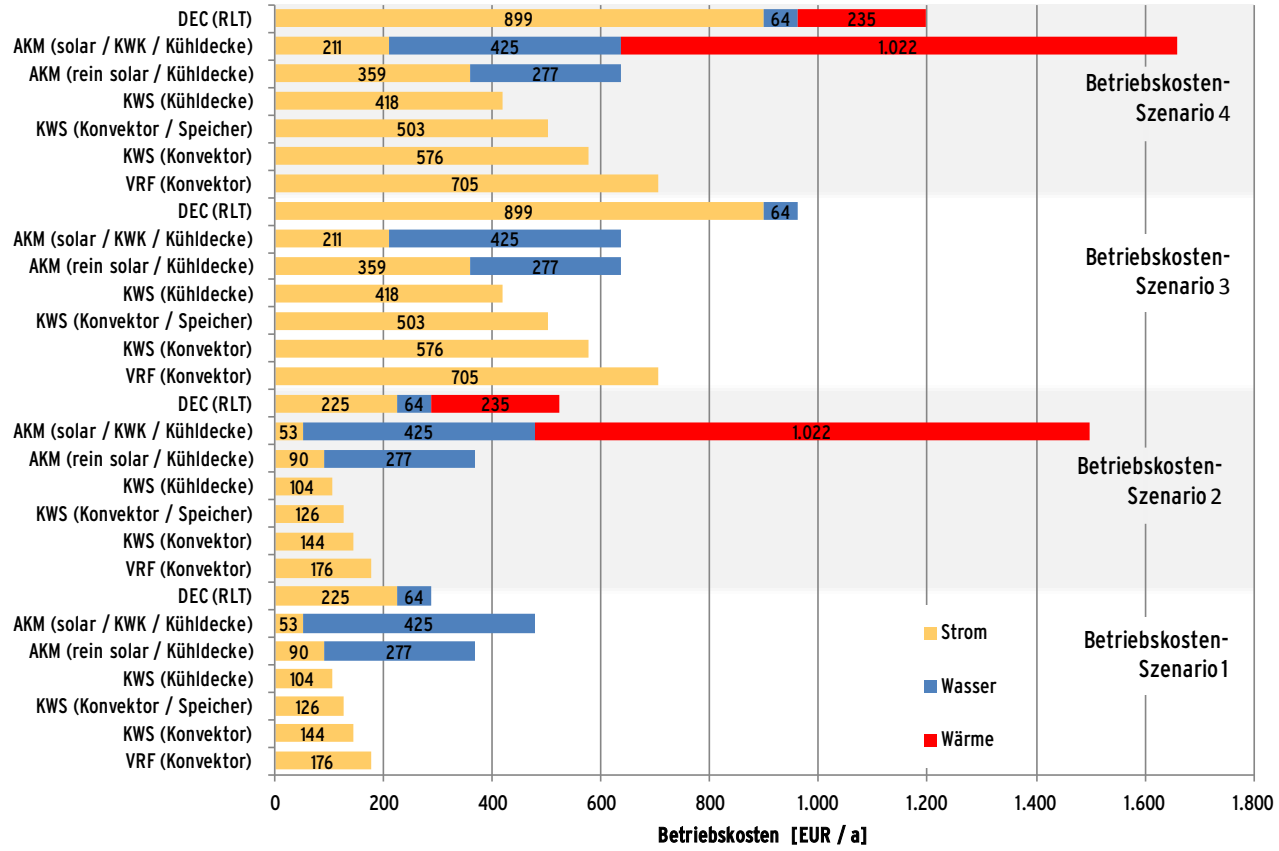
Abbildung 83: Zusammensetzung der Investitionskosten der verschiedenen Kältesysteme



In Abbildung 84 sind die Betriebskosten für das Klima F_E aufgeschlüsselt. Die Kompressionskältesysteme sind für alle betrachteten Betriebskosten-Szenarien günstiger, da hierfür weder Kosten für Wasser noch für Wärme anfallen. Bei dem AKM-System stellt sich die Verwendung eines Nasskühlturms als besonders nachteilig bzgl. der anfallenden Betriebskosten heraus. Die dadurch hervorgerufenen Wasserkosten übersteigen bei weitem leichte Einsparungen beim Elektroenergiebedarf gegenüber den klassischen Systemen ohne Kältespeicher. Alternativ wäre der Einsatz hybrider bzw. trockener Rückkühltechnik denkbar. Hybride Rückkühler sind allerdings deutlich kostenintensiver und der Einsatz trockener Rückkühler führt bei hohen Außentemperaturen zu höheren Rückkühltemperaturen, was die Kälteleistung der Anlage reduziert.

Für die Kostenbetrachtung kann allgemein festgehalten werden, dass bei dem hier untersuchten Anwendungsbeispiel mit einem geringen Nutzungsgrad der untersuchten Kältesysteme die Investitionskosten dominieren. Alternative Kältesysteme wie AKM oder DEC sind dann wirtschaftlich im Nachteil, da diese mit höheren Investitionskosten verbunden sind.

Abbildung 84: Zusammensetzung der Betriebskosten für die verschiedenen Kostenszenarien (Klima: FM)



7.3.4 Ergebnisdiskussion Einzelsysteme

7.3.4.1 Variante 1: AKM - Absorptionskälteanlagen mit Kühldecken

Unter den hier untersuchten Kältesystemen ergeben sich für die Variante mit solargetriebener Absorptionskälteanlage in Verbindung mit einer Backup-Wärmebereitstellung aus KWK die geringsten TEWI-Emissionen. Ein Betrieb ohne Backup-Wärmebereitstellung führt, trotz schlechterer Kühllastbedarfsdeckung, nicht zur weiteren Senkung der TEWI-Emissionen. Ursache ist die höhere Betriebsstundenzahl des Gesamtsystems. Durch geringere Antriebstemperaturen aus der Solaranlage sinkt die Leistung der Kältemaschine. Bei gleichem Leistungsbedarf für Pumpen und Ventilatoren wird eine geringere Raumluftabkühlung erreicht, welche durch eine längere Laufzeit der AKM kompensiert werden muss.

Die folgende Abbildungen zeigen neben den Standardvarianten *FM-KolS-FW* (Flachkollektor 90 m^2, Südausrichtung, mit Fernwärme-Backup) und *FM-KolS* (Flachkollektor 90 m^2, ohne Fernwärme-Backup) weitere Varianten mit geänderter Kollektorfläche, unterschiedlicher Ausrichtung sowie deutlich variierter Größe des Kaltwasserspeichers:

- *FM-KolS60-FW*: Kollektorflächen 60 m^2 statt 90 m^2
- *FM-KolS180-Sp20*: Kollektorfläche 180 m^2 statt 90 m^2, Kaltwasserspeicher 20 m^3 statt 2 m^3 (6...12°C), kein Backup-System
- *FM-KolOW-FW*: Kollektorfläche in zwei Felder mit Ausrichtung nach Ost und West geteilt (Antsellwinkel 45° anstelle von 30° gegenüber der Horizontalen)

- *FM-KolO*: wie *FM-KolOW-FW* nur ohne Backup-Versorgung

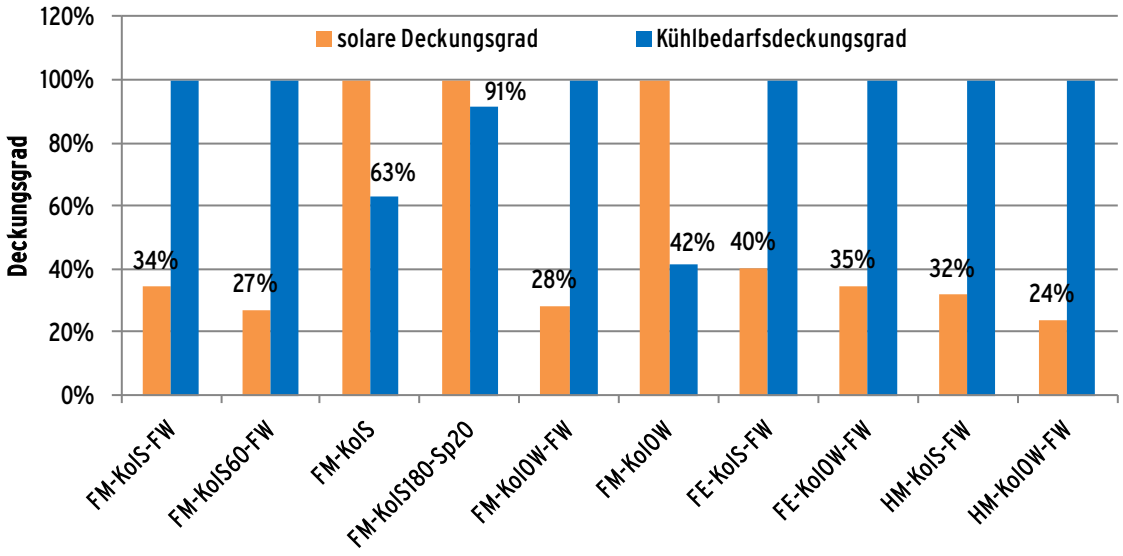


Abbildung 85: Solarer Deckungsgrad und Kühlbedarfsdeckungsgrad für unterschiedliche Systemkonfigurationen mit Absoprtionskälteanlage

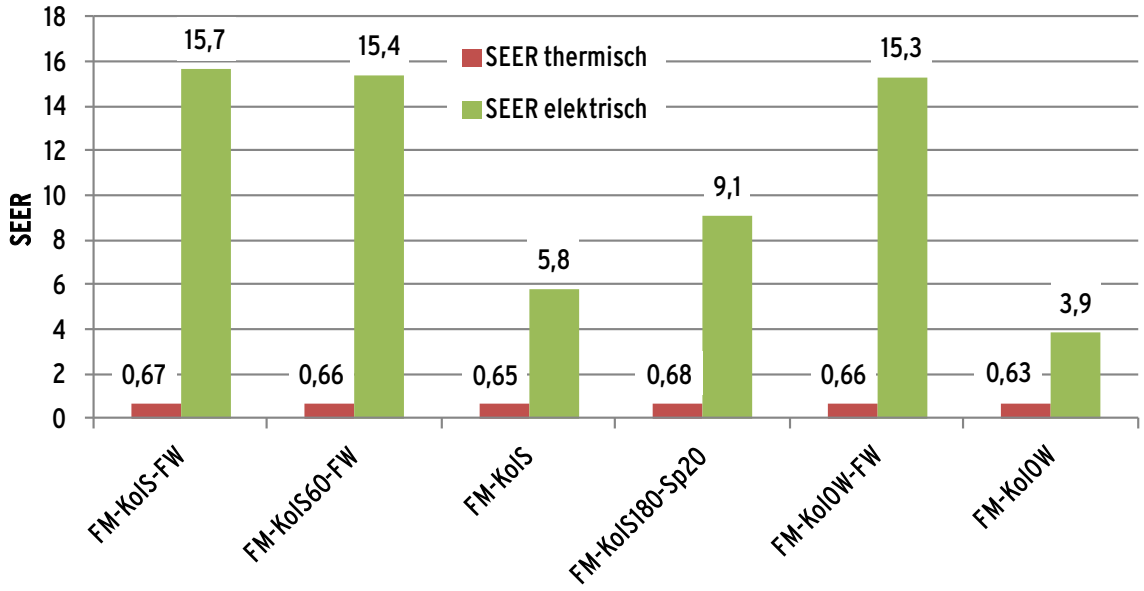
Wie aus Abbildung 85 ersichtlich, werden für die Systeme mit Backup-Versorgung maximal 40% (*FE-KolS-FW*) solarer Deckungsgrad erreicht. Die Minderung des solaren Deckungsgrades bei einer Reduzierung des Kollektorfeldes von 90 m^2 auf 60 m^2 beträgt 7 % für das Szenario F_M. Dies entspricht einem Mehrbedarf an Fernwärme von ca. 1.500 kWh/a. Eine ausschließliche Nutzung der 90 m^2 großen Kollektorfläche zur Kälteerzeugung kann wirtschaftlich daher nicht als sinnvoll erachtet werden.

Die rein solargetriebenen Varianten erreichen Kühlbedarfsdeckungsgrade[13] zwischen 42 % und 91 % (Klimaszenario Frankfurt mittleres Jahr). Trotz des hohen Deckungsgrades der Variante *FM-KolS180-Sp20* von 91% treten Raumlufttemperaturüberschreitungen von über 3 K während ca. 200 Stunden, zwischen 2 und 3 K während 130 Stunden und zwischen 1 und 2 K während 150 Stunden auf. D.h., auch mit großem zusätzlichem Anlagenaufwand können mit rein solargetriebenen Systemen keine behaglichen Raumluftzustände gewährleistet werden.

Die Jahresarbeitszahlen bezogen auf den Wärmebedarf liegen bei allen Varianten zwischen 0,63 und 0,68 und damit auf einem ähnlichen Niveau,. Bezogen auf den Elektroenergiebedarf treten jedoch große Unterschiede auf, siehe Abbildung 86. Die beiden ausschließlich solargetriebenen Systeme *FM-KolS* und *FM-KolOW* liegen mit einem elektrischen EER von 5,8 bzw. 3,9 in etwa auf dem Niveau der Kompressionssysteme (VRF und Kaltwassersatz) und sind damit energetisch in ökologischer und ökonomischer Hinsicht kaum vertretbar. Diese Werte können durch eine deutliche Vergrößerung der Kollektorfläche und des Kaltwasserspeichervolumens erhöht werden. So weist die Systemvariante FM-KolS180-Sp20 bereits einen elektrischen EER von 9,1 auf. Eine solche Steigerung ist allerdings nur mit noch höheren Systemkosten erreichbar. Für die Systeme mit Fernwärme-Backupsystem werden Jahresarbeitszahlen, bezogen auf den Elektroenergiebedarf, von über 15 erreicht.

[13] Der Kühlbedarfsdeckgungsgrad wird definiert als die tatsächlich übertragene Kälteenergie durch die Kühldecken bezogen auf die notwendige Kühlenergie der Kühldecken für das Erreichen der Behaglichkeitskriterien

Abbildung 86: Jahresarbeitszahl bezogen auf Wärme- und Elektroenergiebedarf für verschiedene Systemkonfigurationen mit Absorptionskälteanlage



Zusammenfassend können für wärmegetriebene Kälteerzeugungssysteme zur Klimatisierung folgenden Ergebnisse festgehalten werden:

- Rein solargetriebene Systeme sind bei einem Einsatz in den betrachteten Klimazonen aus ökonomischer und ökologischer Sicht nicht sinnvoll und verfehlen über weite Zeiträume die Behaglichkeitskriterien.
- In Verbindung mit einem Backup-Wärmebezug aus KWK-Anlagen kann das System aus ökologischer und energiewirtschaftlicher Sicht positiv dargestellt werden. Der Primärenergiebedarf sowie die TEWI-Emissionen können gegenüber anderen untersuchten Systemen geringer sein, jedoch ist dies sehr stark von der Verfügbarkeit bzw. Bewertung der benötigten thermischen Energie abhängig.
- Die Nutzung der Kollektorfläche sollte aus wirtschaftlicher Sicht auf andere Anwendungen außerhalb der Kühlperiode erweitert werden (Heizungsunterstützung, Warmwasserbereitung).
- Voraussetzung für Effizienz und Wirtschaftlichkeit der komplexen solargetriebenen Anlagensysteme sind Prognose-basierte Reglungsstrategien mit einer Vielzahl von Eingangsgrößen, wie Wetter- und Kühlbedarfsvorhersage.

7.3.4.2 Variante 2: VRF – Multi-Split-VRF-System

Abbildung 87 zeigt die Häufigkeit des Betriebs eines VRF-Systems in unterschiedlichen Lastbereichen. Es wird deutlich, dass VRF-Anlagen überwiegend im niedrigen Teillastbereich arbeiten, in ca. 80 % sogar unter 40 % der Volllast. Gerade in diesem unteren Teillastbereich weist dieser Anlagentyp einen starken Effizienzabfall auf. Ursachen sind u.a.:

- Keine internen Kälteleistungsspeicher, die Kälteleistung muss durch Regelung (Verdichterdrehzahl, Heißgas-Bypass) den aktuellen Bedingungen angepasst werden.
- Betrieb des Motors bei geringen Drehzahlen und geringen Lasten weit ab vom Effizienzoptimum

- Zur Ölabscheidung sind Mindestkältemittelmassenströme aufrecht zu erhalten, d.h. für sehr kleine Kälteleistung ist ein Bypass-Betrieb) notwendig, der zu einer deutlichen Minderung der Leistungszahl führt. Bei dieser Betriebsart wird das durch die Kompression erhitzte Kältemittel am Kondensator vorbeigeführt und ohne Verflüssigung in die Sauggasleitung eingespeist.
- Verdampfungstemperatur nach oben begrenzt (oft maximal 6 °C am Innengerät)

Abbildung 87: Häufigkeitsverteilung von Leistungsstufen des VRF-Systems für erzeugte Kälte (Betrachtungszeitraum entspricht nur dem Anlagenbetrieb, Klimaszenario: FM)

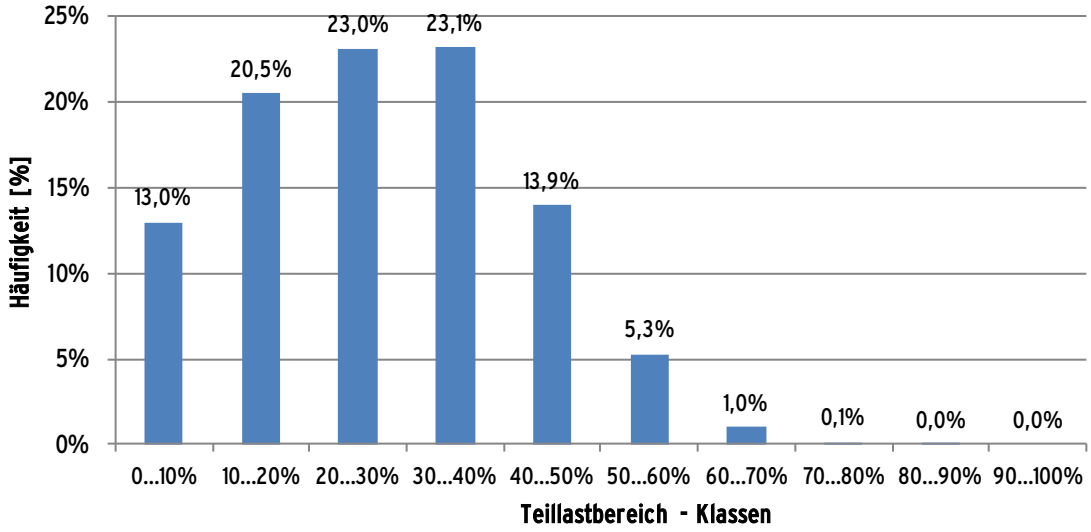


Abbildung 88 zeigt die erzeugte Kältemenge in den Leistungsstufen der Anlage, sowie den mittleren EER der Kälteerzeugung je Leistungsstufe bezogen auf die erzeugte Kälte. Die Verteilung verschiebt sich gegenüber Abbildung 87 hin zu höheren Leistungsstufen, da bei gleicher Laufzeit in einer höheren Leistungsstufe mehr Kälte erzeugt wird. Da geringe Teillastbereiche vorrangig aufgrund niedriger Außentemperaturen resultieren (Anteil äußere Lasten ist gering) sind auch die mittleren EER-Werte, bezogen auf die erzeugte Kälte, bedingt durch den geringeren Temperaturhub recht hoch. Die resultierende Verteilung der Kälteleistungszahl (EER) während des Anlagenbetriebs ist in Abbildung 89 dargestellt.

Abbildung 88: Aufteilung der erzeugten Kälte sowie der mittleren Leistungszahl bezogen auf die erzeugte Kälte auf die Leistungsstufen des VRF-Systems (Klimaszenario: FM)

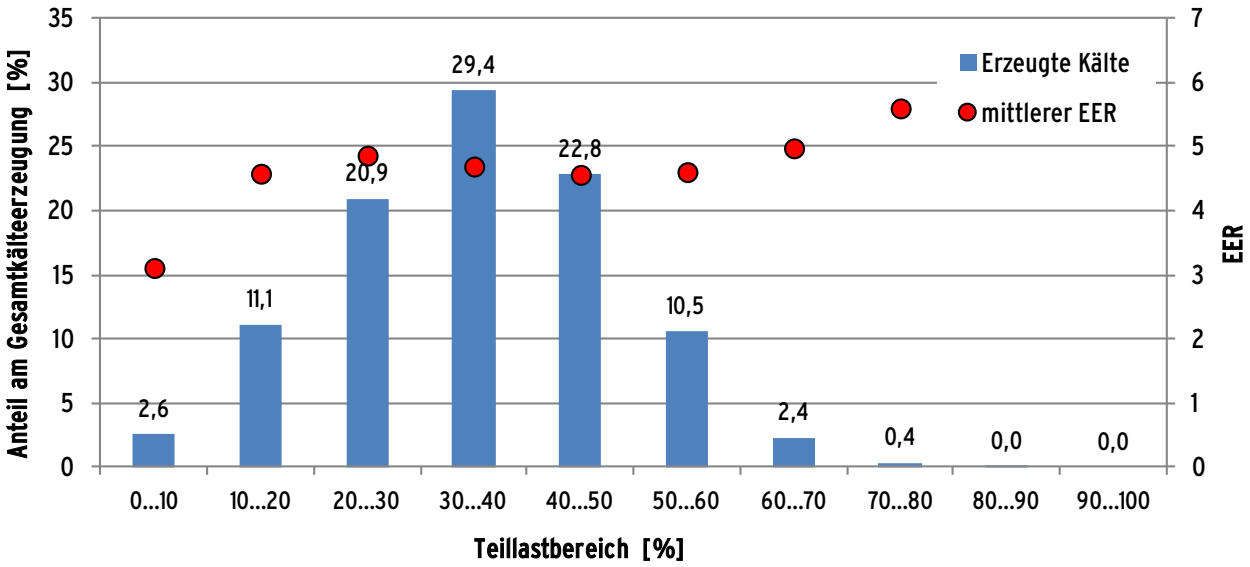
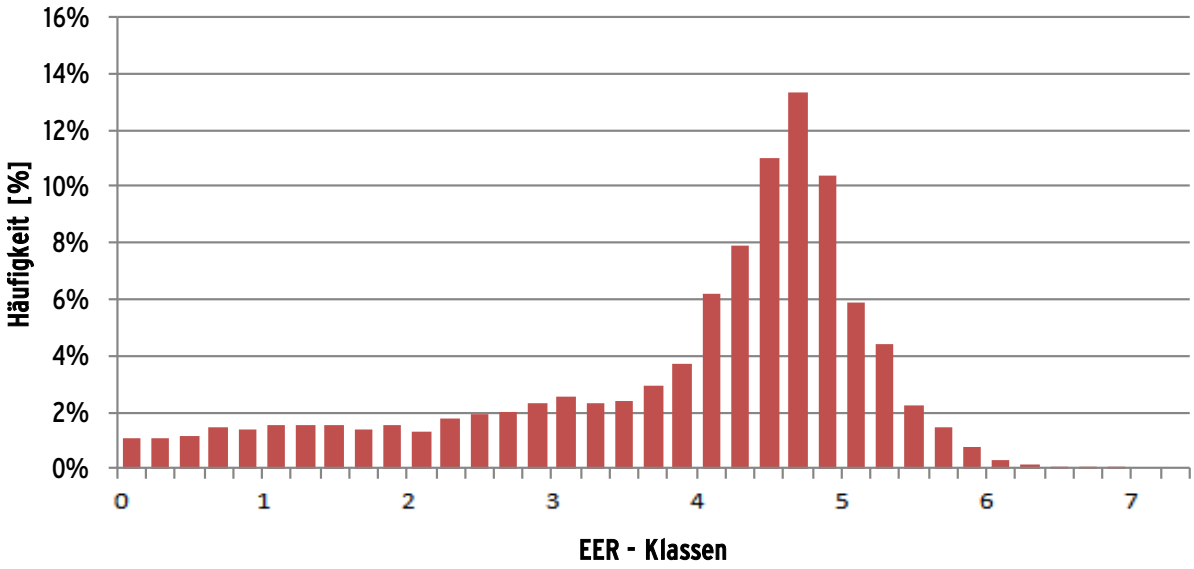


Abbildung 89: Häufigkeitsverteilung des EER des VRF-Systems über die Betriebszeit (Klimaszenario: FM)



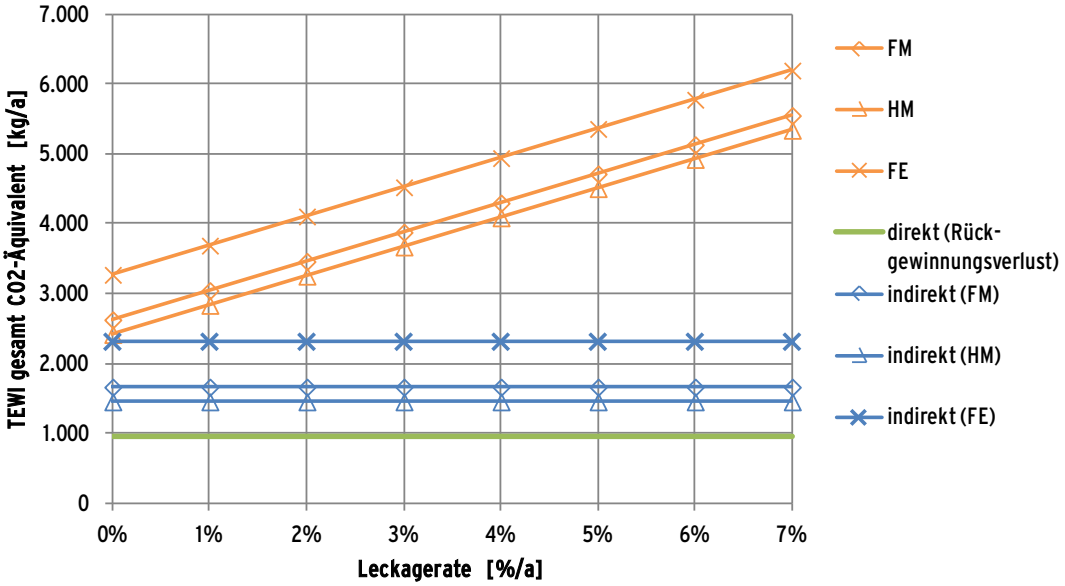
Erwähnenswert ist zudem der Einfluss des Durchmessers der Sauggasleitung. Für die berechnete Anlage vergrößert sich der Energiebedarf um 20 % im Falle einer Reduzierung des Rohrdurchmessers von 33,7 auf 21,3 mm bei 50 m Sauggasleitungslänge. Hieraus resultiert die dringende Notwendigkeit einer durchdachten Auslegung der Kältemittelleitungen.

Positiv hervorzuheben ist für VRF-Systeme die gute individuelle Regelmöglichkeit.

Hauptursache des hohen TEWI-Werts bei VRF-Systemen sind große Kältemittelfüllmengen in Verbindung mit vergleichsweise großen Leckraten (vgl. Tabelle 14). Ca. 70 % des Gesamt-TEWI entfallen auf den direkten Anteil. Eine Füllmengenreduzierung ist aufgrund der langen kältemittelführenden Rohrleitungen wenig realistisch. Zudem kommt bei der Installation dieser Geräte häufig eine relativ große Anzahl lösbarer Schraubverbindungen zum Einsatz. Diese führen, wie in Abschnitt 7.2.2 (ab S. 110) diskutiert, häufig zu höheren Leckraten. Abbildung 90 zeigt den Einfluss der Leckrate auf die TEWI-Gesamtemissionen. Wird die in der

ChemKlimaSchutzV geforderte Leckrate von maximalen 4 % erreicht (vgl. Tabelle 42 im Anhang), können die TEWI-Gesamtemissionen zwischen 20 und 23 % gesenkt werden.

Abbildung 90: TEWI für VRF-Systeme mit dem Kältemittel R410A in Abhängigkeit von der Leckrate

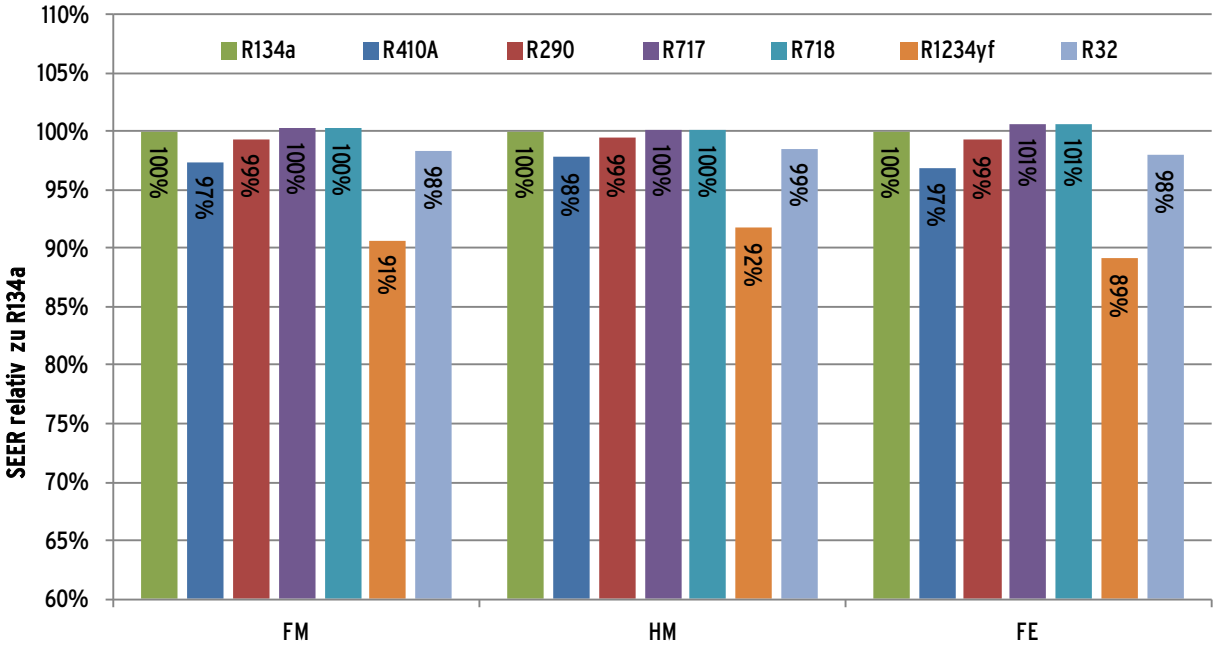


7.3.4.3 Variante 3: KWS – Kaltwassersatz

Im vorliegenden Vergleich weist der Kaltwassersatz einen geringeren Endenergiebedarf als das VRF-System auf. Dies ist zum Teil bedingt durch die Wahl einer relativ hohen Kaltwasservorlauftemperatur (10 °C bei Konvektor-System, 14 °C beim System mit Kühldecke). Darüber hinaus kann durch den Einsatz einer Kühldecke ein Teil des elektrischen Energiebedarfes reduziert werden, da im Gegensatz zu den Konvektoren keine Ventilatoren für die Kälteübergabe erforderlich sind.

Bei den Berechnungen von Systemen mit Kaltwassersatz wurden verschiedene Kältemittel (R410A, R290, R134a, R717, R718 und R1234yf) berücksichtigt. In Abbildung 91 sind die Ergebnisse zur berechneten Jahresarbeitszahl (SEER) des Kältesystems aufgetragen. Die Vorgehensweise bei den Berechnungen erlaubt allerdings nur einen ersten Eindruck zu dem Einfluss der Kältemittelwahl. Aus Gründen einer nötigen Vereinfachung sind im Berechnungsmodell keine detaillierten, kältemittelspezifischen Besonderheiten bzgl. des Anlagenaufbaus berücksichtigt (bspw. wird bei dem Kältemittel R290 i.d.R. ein interner Wärmeübertrager in Kältekreislauf zur Sauggasüberhitzung verwendet). Die daraus resultierenden Ergebnisse sind sehr stark an die reinen Kältekreislaufberechnungen angelehnt (siehe Abbildung 42 und Abbildung 44, S. 91 f), nur dass zusätzlich ein tages- bzw. jahreszeitlich bedingtes Lastprofil und verschiedene Anlagenkomponenten (Pumpen, Ventilatoren) in den Vergleich einfließen. Es zeigt sich auch hier, dass die Wahl des Kältemittels einen erkennbaren Einfluss auf den Energiebedarf des Kältesystems hat. Für alle betrachteten natürlichen Kältemittel (R290, R717 und R718) sowie für das Kältemittel R134a ergeben sich relativ hohe Jahresarbeitszahlen. Deutlich schlechtere Effizienzwerte ergeben sich aus den Berechnungsergebnisse mit den Kältemitteln R410A, R32 und insbesondere R1234yf auf.

Abbildung 91: Berechneter Einfluss verschiedener Kältemittel auf die energetische Effizienz des Kaltwassersatz-Systems

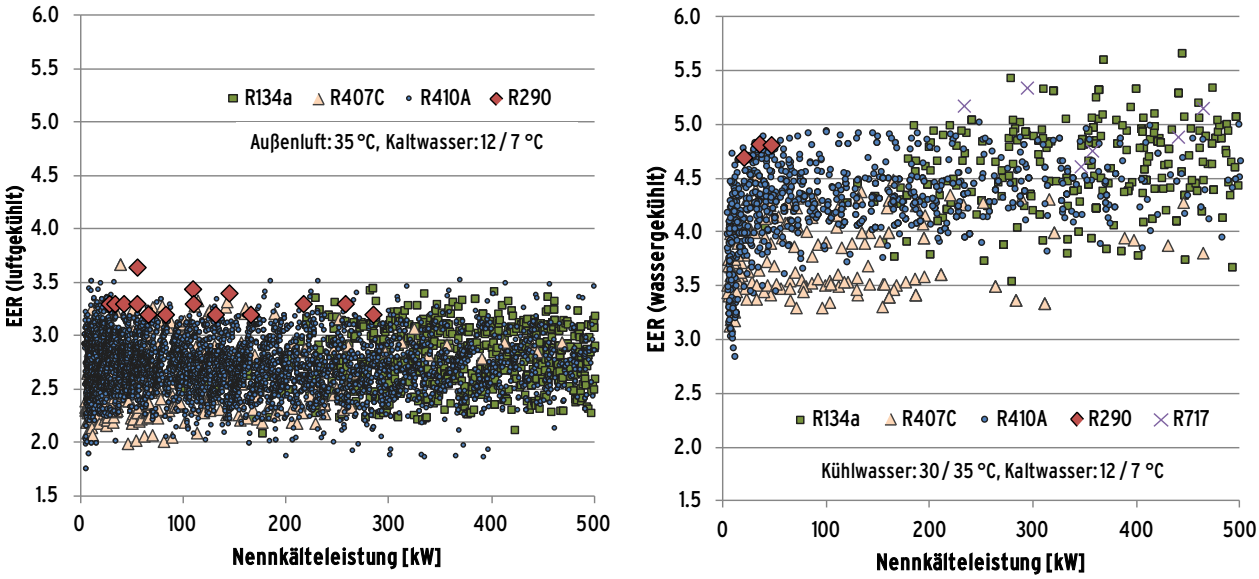


Eine weitere Möglichkeit zur Bewertung des Kältemitteleinflusses auf die Anlageneffizienz ist die Betrachtung der Leistungszahlen marktverfügbarer Anlagen. Hierfür wurden Datenblätter verschiedener Hersteller sowie die von Eurovent zur Verfügung gestellte Datenbank genutzt. Eine große Anzahl von Daten lässt sich für gängige HFKW- Kältemittel wie R134a, R410A bzw. R407C zusammenstellen. Werte für die natürlichen Kältemittel R290 und R717 sind nur in sehr begrenzter Anzahl verfügbar. Für die Kältemittel R718, R1234yf, R32 liegen keine repräsentativen Daten vor. In Abbildung 92 sind sämtliche Punkte für luft- und wassergekühlten Systeme in einem Kälteleistungsbereich von 0 bis 500 kW aufgetragen. Berücksichtigt werden Werte, die bei folgenden Bedingungen gelten:

- 35 °C Außenlufttemperatur (luftgek.) bzw. 30/35 °C Kühlwassertemperatur (wassergek.)
- 12/7 °C Kaltwassertemperatur

Die Leistungszahlen luftgekühlter Systeme sind von der Nennkälteleistung der Anlagen relativ unabhängig und im Durchschnitt über alle Kältemittel mit ca. 2,8 zu beziffern. Aus dem Diagramm mit den wassergekühlten Systemen (Abbildung 92, rechts) lässt sich bei einer differenzierten Betrachtung der einzelnen Kältemittel ebenfalls kein signifikanter Trend über den abgebildeten Leistungsbereich erkennen. Nur im unteren Leistungsbereich (<20 kW) zeichnen sich teilweise deutlich geringere Effizienzen ab. Die über alle Werte gemittelte Leistungszahl liegt mit etwa 4,5 deutlich über dem Wert der luftgekühlten Systeme.

Abbildung 92: Marktübersicht zur Leistungszahl EER (bei Nennkälteleistung) für luft- und wassergekühlte Kaltwassersätze bei Verwendung verschiedener Kältemittel und Nennkälteleistungen (Quelle: Eurovent, verschiedene Hersteller)

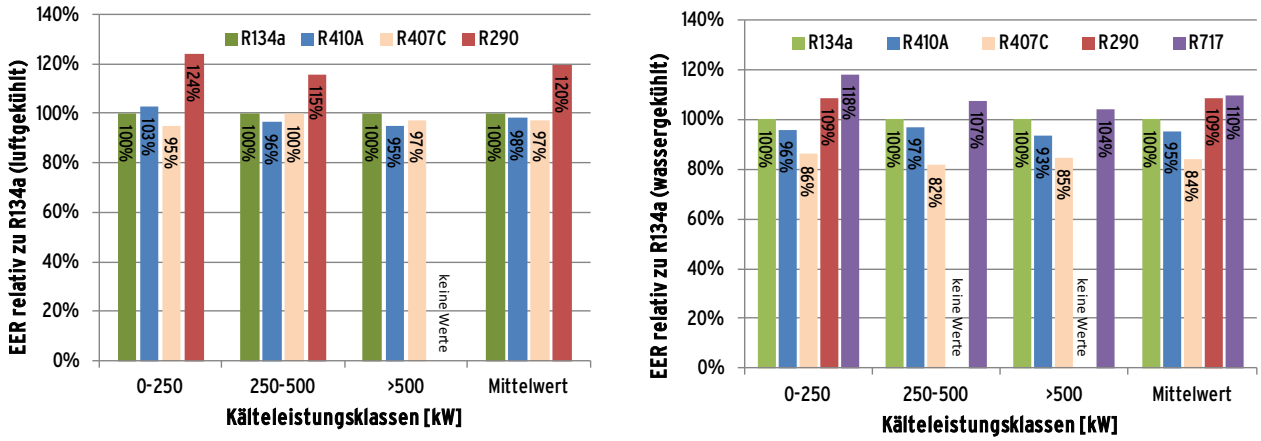


Bei einem relativen Vergleich der verschiedenen Kältemittel (siehe **Fehler! Ungültiger Eigenverweis auf Textmarke.**) spiegeln sich die Ergebnisse aus den theoretischen Betrachtungen wider. R134a liefert unter den betrachteten HFKW-Kältemitteln die besten Ergebnisse. Natürliche Kältemittel, wie R290 und R717 liegen noch darüber, wobei die dazugehörigen Werte die Berechnungsergebnisse (Abbildung 91) zum Teil weit übersteigen. Hierfür sind folgende Ursachen denkbar:

- geringe Datenbasis zu den natürlichen Kältemitteln
- qualitativ überdurchschnittliche Komponentenauslegung (Verkaufsargument, Alleinstellungsmerkmal)

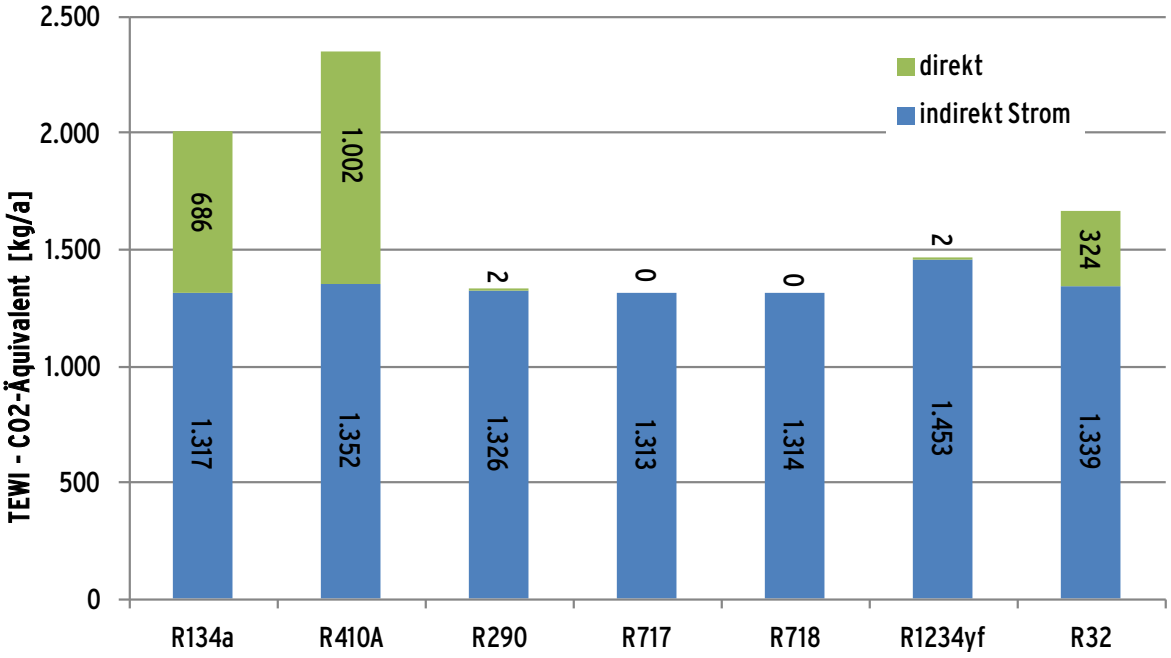
Der potentielle Einfluss des Kältemittels auf den TEWI-Gesamtwert wird in Abbildung 94 exemplarisch für das Kältesystem Kaltwassersatz am Beispiel der Klimaregion FM dargestellt. Unterschiede bei den direkten Anteilen ergeben sich dabei aus den GWP-Werten der jeweiligen Kältemittel. Indirekte Anteile aus dem Elektroenergiebedarf werden aus Modellberechnungen abgeleitet. Hierdurch gelingt die Einschätzung des Anteils vom direkten TEWI auf den Gesamtwert bei der Verwendung verschiedener Kältemittel. So ergibt sich durch den Einsatz des Kältemittels R410A der bei diesem Vergleich höchste direkte TEWI-Anteil von ca. 40 % des Gesamtwertes, gefolgt von R134a mit ca. 32 % und R32 mit ca. 18 %. Bei dem HFKW-Kältemittel R1234yf und den natürlichen Kältemitteln R290, R717 und R718 hat der direkte TEWI-Anteil einen sehr geringen bis keinen Einfluss auf den Gesamtwert.

Abbildung 93: Relativer Vergleich der Anlageneffizienz für den Einsatz verschiedener Kältemittel abgeleitet aus der Marktübersicht (vgl. Abbildung 92).



Der Einfluss der HFKW-Kältemittel ist immer abhängig von den spezifischen Einsatz- und Anlagengegebenheiten (Anlagenauslastung, Leckrate, etc.). Der vorgenommene Vergleich verdeutlicht noch einmal prinzipiell, wie hoch der Einfluss der GWP-Werte des eingesetzten Kältemittels auf die Gesamttreibhauswirkung auch bei Kaltwassersätzen sein kann (Abbildung 85). Er fällt besonders hoch aus, wenn die Anlage mit geringer Auslastung betrieben wird (im Beispiel < 500 Vollbenutzungsstunden im Jahr). Auch wenn der direkte TEWI-Anteil aufgrund kleinerer Füllmengen wesentlich geringer ist als bei direktverdampfenden Systemen, beeinflusst die Wahl des Kältemittels den Gesamt-TEWI erheblich. Der Einsatz natürlicher Kältemittel kann hier einen großen Beitrag zur Reduzierung der von Kälteanlagen verursachten Treibhauswirkung leisten.

Abbildung 94: TEWI-Betrachtung für Kaltwassersatz mit unterschiedlichen Kältemitteln für das Klimaszenario Frankfurt mittleres Jahr (FM)



7.3.4.4 Variante 4: RLT - Raumlufttechnische Anlage mit DEC-System

Beim Einsatz einer RLT-Anlage mit DEC-System sind mehrere Vorteile miteinander kombiniert:

- Kein Einsatz von Kältemitteln und damit auch keinen direkten TEWI-Anteil
- Luftfeuchte der Zuluft kann gezielt eingestellt werden
- höhere Luftwechselraten ermöglichen eine hohe Raumluftqualität
- Effizienter systeminhärenter Plattenwärmeübertrager ermöglicht hohe Rückwärmzahlen (0,8), was besonders bei niedrigen Außentemperaturen von Vorteil ist

Diese Vorteile haben zum Teil den Nachteil eines erhöhten Energiebedarfes. So werden bei den verglichenen Systemen viel geringere Luftwechselraten berücksichtigt (bis zu 5,4 bei DEC-System, 0,6 bei übrigen Systemen). Die hohen Luftwechselraten sind bei dem DEC-System z.T. zur Deckung der Kühllast erforderlich. Bei den übrigen Systemen wird von einer mittleren Anforderung bzgl. der Raumluftqualität ausgegangen. Bestehen höhere Anforderungen an die Raumluftqualität oder werden zusätzliche Emissionen in den Raum eingetragen (z.B. in einem Raucher-Bereich), müssen die Luftwechselraten angepasst werden (DIN-EN-13779 2005). Dies hätte eine Erhöhung der Ventilatorleistung und damit des Energiebedarfes aller Systeme zur Folge, wobei sich das DEC-System mit den ohnehin hohen Luftwechselraten relativ zu den verglichenen Systemen verbessern würde.

Darüber hinaus wird nur mit diesem System ein Überschreiten der Behaglichkeitsgrenze bzgl. Luftfeuchtigkeit durch eine geregelte Luftentfeuchtung vermieden. Die auskondensierte Wassermenge ist deutlich höher als bei den Systemen im Vergleich (vgl. Abbildung 79, S. 131). Hohe Luftwechselraten bewirken einen hohen Entfeuchtungsbedarf.

Ein großer Nachteil des Systems ist, dass hohe Kältelasten nicht oder nur durch einen hohen Lüftungsenergieaufwand gedeckt werden können. Durch eine auf dem Markt bereits verfügbare Ergänzung des DEC-Systems mit einer nachgeschalteten Kompressionskälteanlage ließe sich das System möglicherweise mit einem geringeren Elektroenergieaufwand betreiben. Allerdings können sich dann die Art des verwendeten Kältemittels und die auftretenden Kältemittelverluste im Kompressions-Kältekreislauf wiederum stark negativen auf den TEWI auswirken.

7.4 Industriekältebereitstellung

7.4.1 Ausgewählte Kältesysteme

7.4.1.1 Variante 5: KWS – Kaltwassersatz

Der Kaltwassersatz für die Industriekältebereitstellung unterscheidet sich bzgl. des prinzipiellen Aufbaus nicht vom Kaltwassersatz für die Gebäudeklimatisierung. Die Kälteübergabe vom Kältemittel zum Kälteträger erfolgt, unabhängig vom Kältemittel, mit gleicher minimaler Temperaturdifferenz. Die Kälteübergabe auf der Seite des Kälteverbrauchers wird nicht im Detail modelliert und über eine Wärmebilanz berücksichtig.

Abbildung 95: R-I-Schema des Kaltwassersatzes

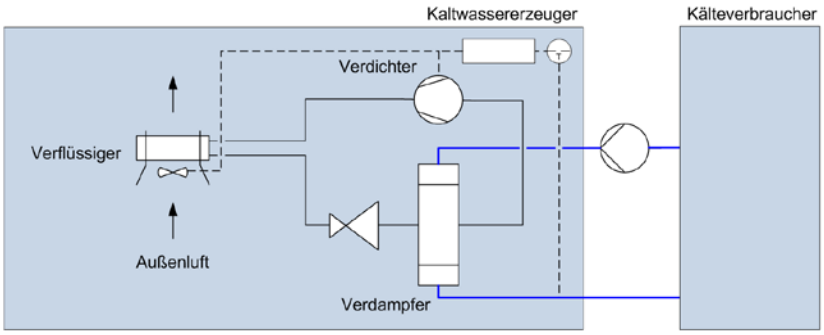


Tabelle 23: Systemparameter – Variante 5 (Industriekälte, KWS)

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Kältebedarf	$\dot{Q}_{0,N,Ind\text{-}KWS}$	500	kW
Verdampfungstemperatur	$t_{0,Ind\text{-}KWS}$	-1	°C
Vorlauftemperatur des Kälteträgers	$t_{RL,Ind\text{-}KWS}$	2	°C
Kältemittel	-	R410a	-
Kältemittelfüllmenge	m_{KM}	250	kg

7.4.1.2 Variante 6: AKM – BHKW-abwärmegetriebene Absorptionskältemaschine

Die AKM arbeitet mit dem Arbeitsstoffpaar Ammoniak/Wasser. Das System wird von der Abwärme eines BHKW geheizt. Für eine möglichst konstante Kaltwasservorlauftemperatur ist zum einen ein Kaltwasserspeicher im System integriert Zum anderen liegt die Solltemperatur für die Kaltwasserversorgung des Speichers leicht (0,5 K) unterhalb der nominalen Vorlauftemperatur zum Verbraucher. Sie ist durch eine Rücklaufbeimischung einstellbar. Die Abwärme wird durch einen trockenen Rückkühler mit adiabater Luftvorkühlung an die Umgebung abgeführt. Die adiabate Vorkühlung ist oberhalb einer Umgebungstemperaturen von 16 °C aktiv.

Abbildung 96: R-I-Schema des Kältesystems mit BHKW-abwärmegetriebener Absorptionskälteanlage

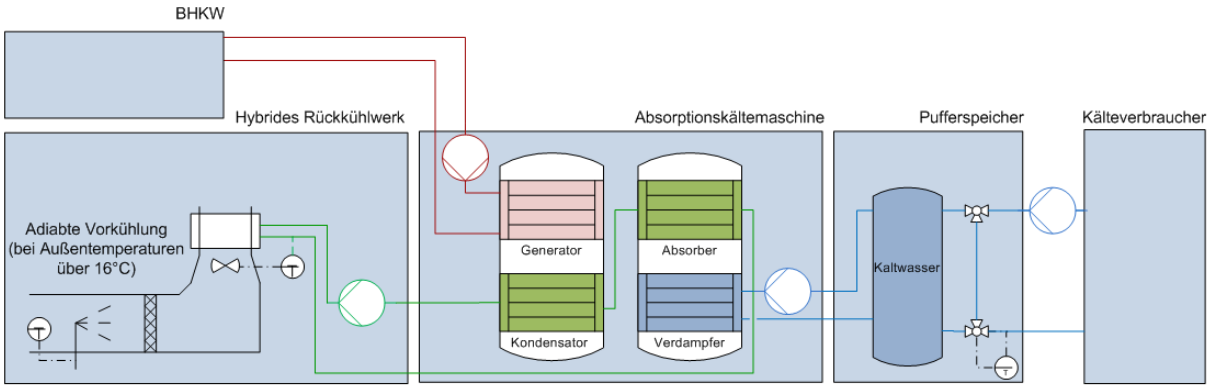


Tabelle 24: Systemparameter – Variante 6 (Industriekälte, AKM)

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Kältebedarf	$Q_{0,N,Ind\text{-}AKM}$	500	kW
Nennleistung Rückkühler[14]	$Q_{RK,N,TRK}$	2616	kW
Abwärmeleistung BHKW	$Q_{AW,N,BHKW}$	860	kW
Kaltwasserspeicher	$V_{Sp,KaW}$	2,0	m^3
Stoffpaar – Absorptionskältemaschine	-	NH_3/H_20	-

7.4.1.3 Variante 7: Direkt Verd. – System mit Direktverdampfung

Das System dieser Variante ist dem VRF-System aus der Gebäudeklimatisierung sehr ähnlich. Der einzige Unterschied besteht darin, dass der Vorgang der Kälteübergabe bei der Modellierung keine Berücksichtigung findet. Es wird ausschließlich die geforderte Kälteleistung bei einer vorgegebenen Verdampfungstemperatur bereitgestellt.

Abbildung 97: R-I-Schema des simulierten Systems mit Direktverdampfung

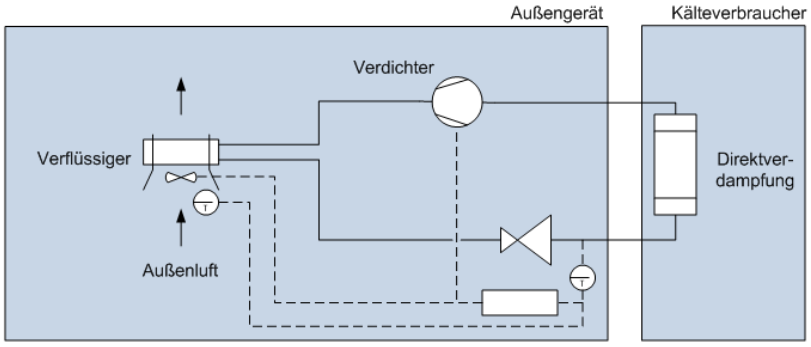


Tabelle 25: Systemparameter – Variante 7 (Industriekälte, direktverdampfendes System)

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Kältebedarf	$Q_{0,N,Ind\text{-}DV}$	500	kW
Verdampfungstemperatur	$t_{0,Ind\text{-}DV}$	2	°C
Kältemittel	-	R723, R134a	-
Kältemittelfüllmenge	m_{KM}	350	kg

[14] Katalogwert AIA-Rückkühler Modell XP120-1, für $t_{KüW}$ = 40/35 °C bei t_{TK} = 25 °C, Drehzahl B Creating Citation...

7.4.2 Modellierung

7.4.2.1 Modell des Industriekälteverbrauchers

Für die vergleichenden Berechnungen der Industriekältesysteme wird eine konstante Kältelast von 500 kW bei einer Kaltwasser-Vorlauftemperatur von +2 °C vorausgesetzt. Bei direkt verdampfenden Systemen beträgt die Verdampfungstemperatur ebenfalls +2 °C.

7.4.2.2 Kältesysteme

Für die Modellierung der Kältesysteme im Industriekältebereich wurden Annahmen getroffen, die sich weitestgehend mit denen bei der Berechnung der Gebäudeklimatisierung decken und im Abschnitt 7.3.2.2 (Seite 103) aufgeführt sind. Ergänzende Angaben zur Modellierung der speziellen Kältesysteme für die Industriekältebereitstellung sind in den Anlagen zu finden (siehe Abschnitt 11.2.2).

7.4.3 Ergebnisse

Die Auslegung und Regelung aller untersuchten Systeme erfolgt auf Basis einer vollständigen Bedarfsdeckung über den gesamten Betrachtungszeitraum. Die Annahme eines konstanten Leistungsbedarfs führt durch den weiten Bereich der Umgebungstemperaturen zwischen Winter und Sommer zu stark variierenden Lastzuständen der Kälteanlagen. Eine Aufteilung auf Einzelanlagen in einem Anlagenverbund zum Reduzieren der Zeiten mit Teillastbetrieb kann hierbei erhebliche Effizienzpotenziale erschließen. Im Rahmen der Studie wurden die Systeme jeweils als Einzelanlage betrachtet.

7.4.3.1 Energiebedarf

Abbildung 98 stellt den Endenergiebedarf für Elektroenergie und Wärme der untersuchten Industriekältesysteme dar. Der Elektroenergiebedarf der Absorptionskälteanlage liegt mit ca. 220 bis 240 MWh/a bei ca. 40% der direktverdampfenden Systeme. Der Elektroenergiebedarf der direktverdampfenden Systeme ist mit einem Unterschied kleiner 1% praktisch identisch zwischen den Kältemitteln R723 und R134a für alle Klimaszenarien. Für das indirekte System ergibt sich ein Mehrbedarf von etwa 18% gegenüber den direkten Systemen.

Wärmebedarf besteht nur für die Absorptionskälteanlage. Dieser ist mit etwa 7.500 MWh/a sehr hoch verglichen mit den Elektroenergiebedarfen der anderen Systeme. Die Ursache liegt in der Effizienzcharakteristik der Absorptionskälteanlage. Das erzielte Wärmeverhältnis steigt nicht stetig mit sinkender Rückkühltemperatur an, wie es bei Kompressionskälteanlagen der Fall ist (vgl. Abbildungen 105 und 106 sowie die Diskussion zur Absorptionskältemaschine im Abschnitt 7.4.4 ab S. 153). Ökologisch und wirtschaftlich sinnvoll ist der Einsatz einer Absorptionskälteanlage nur dann, wenn es sich bei der Antriebswärme um sonst ungenutzt an die Umgebung abgegeben Wärme handelt (z.B. Abwärme aus Industrieprozess).

Abbildung 98: Elektrischer / thermischer Endenergiebedarf unterschiedlicher Industriekältesysteme unter verschiedenen Klimaszenarien (500 kW ganzjährige Kälteleistung bei +2 °C Kaltwasser- / Verdampfungstemperatur zur Kälteübergabe)

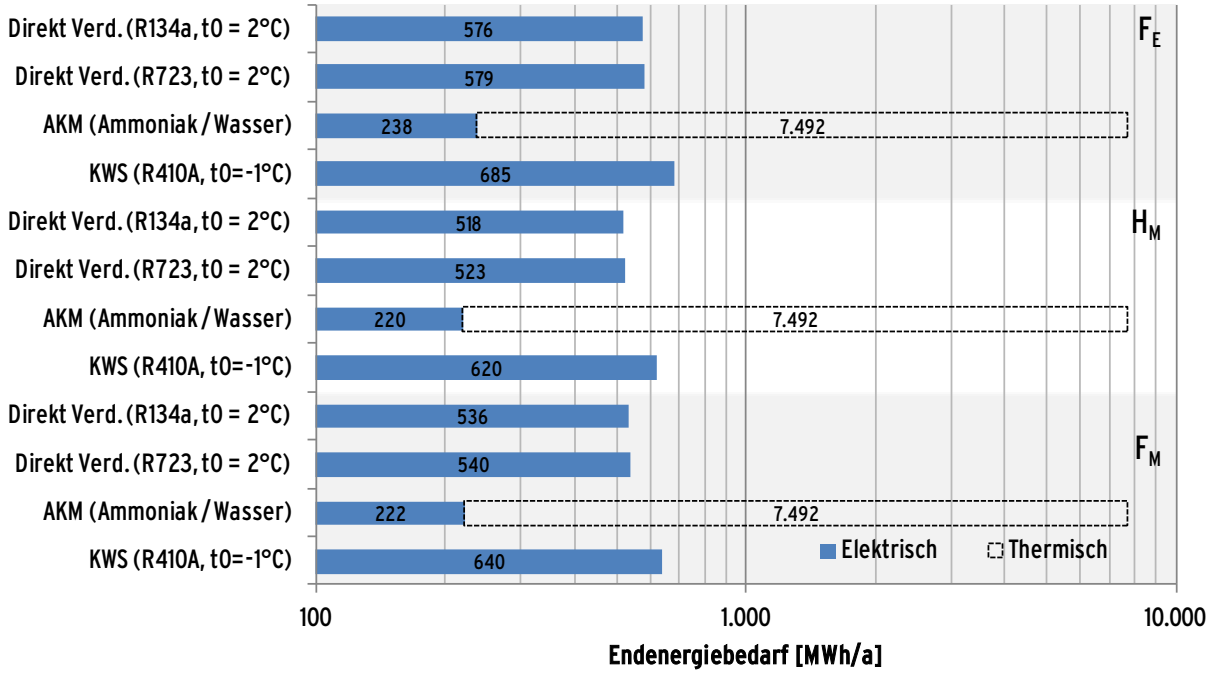
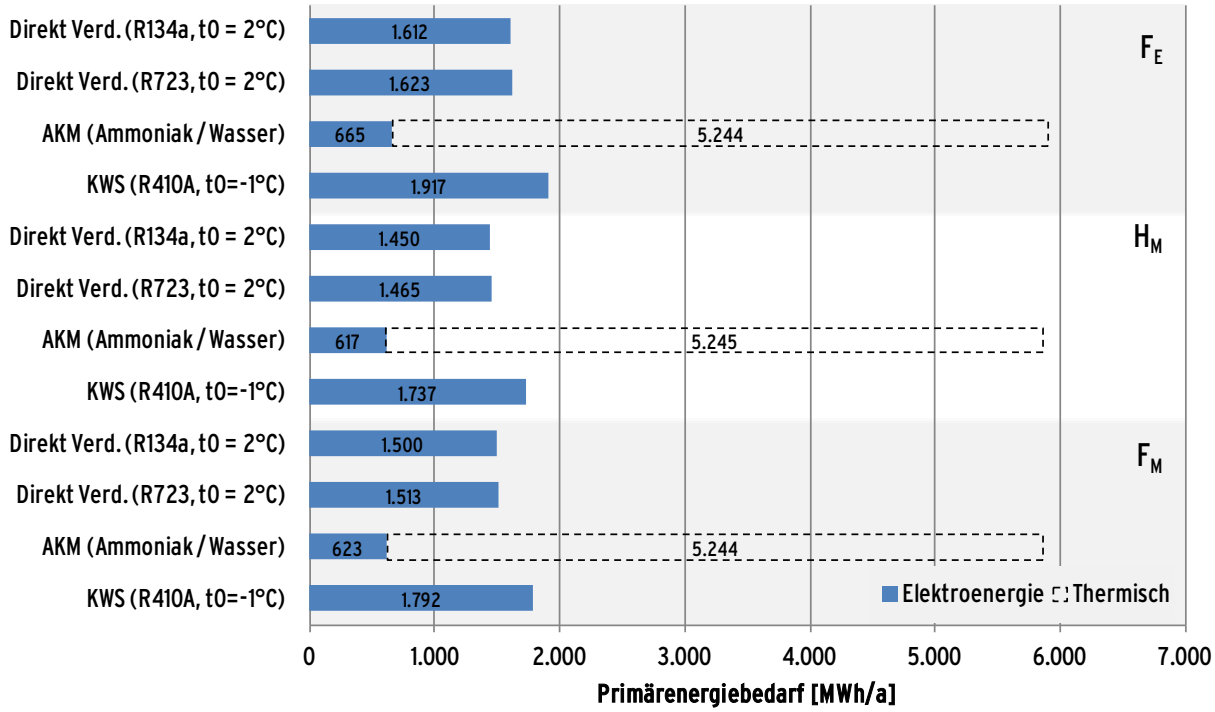


Abbildung 99 zeigt den Primärenergiebedarf der jeweiligen Anlagenvariante. Zur Berechnung des Primärenergiebedarfs wurden die Faktoren aus dem Entwurf zur EnEV 2013 herangezogen, welche für den Gebäudebereich entwickelt wurden. Die Absorptionskälteanlagen weisen hier einen erheblich höheren Gesamtprimärenergiebedarf auf als die Kompressionskältesysteme. Dies führt ebenfalls zu der Schlussfolgerung, dass der Einsatz einer Absorptionskälteanlage nur dann Vorteile gegenüber einem Kompressionskältesystem aufweist, wenn primärenergetisch wenig aufwändige Abwärme zur Verfügung steht.

Abbildung 99: Primärenergiebedarf der unterschiedlichen Industriekältesysteme unter verschiedenen Klimaszenarien (500 kW ganzjährige Kälteleistung bei +2 °C Kaltwasser- / Verdampfungstemperatur zur Kälteübergabe)



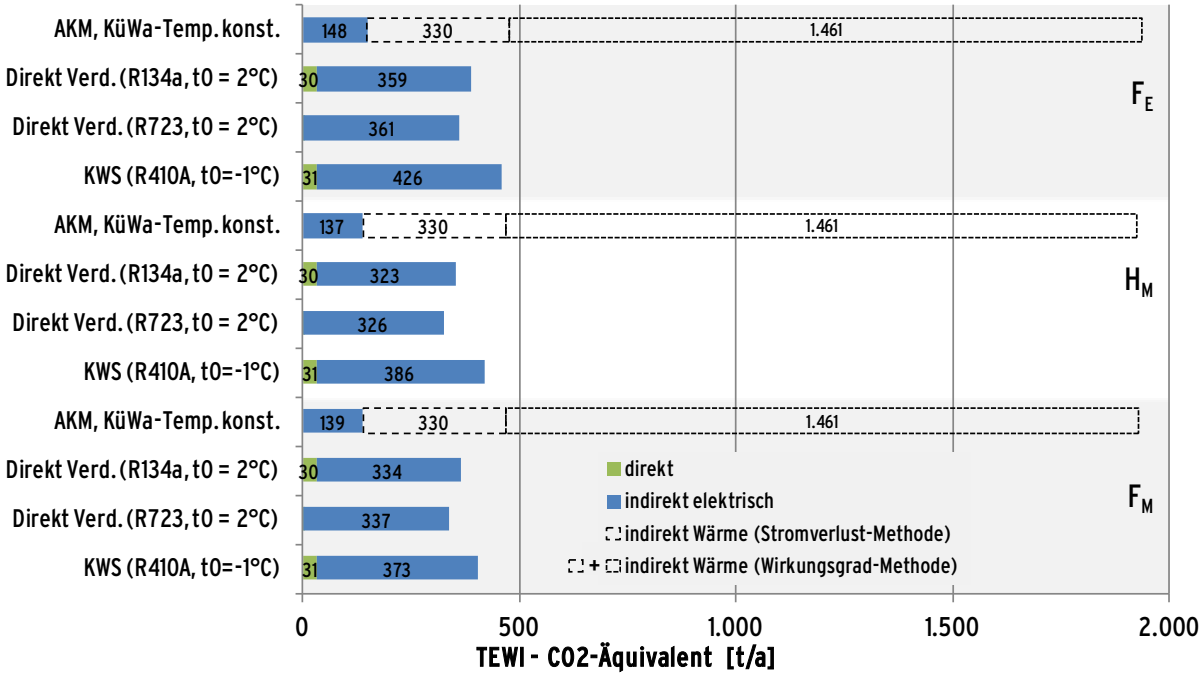
Die Kältebereitstellung mit der AKM ist aus elektroenergetischer Sicht herausragend effizient im Vergleich zu den anderen Systemen. Hinzu kommt jedoch bei der betrachteten Anwendung ein großer Bedarf an thermischer Energie, welcher im ungünstigen Fall dem bis zu 30-fachen des elektrischen Energiebedarfs der AKM entspricht. Die benötigte thermische Leistung des Systems ist direkt vom Wärmeverhältnis (Verhältnis von erzeugter Kälteleistung zu nötiger Wärmeleistung) der AKM abhängig. Dieses ist für eine Single-Effekt-Anlage, welche für die Berechnungen angenommen wurde, nach oben begrenzt. Das Wärmeverhältnis ließe sich durch den Einsatz einer Multi-Effekt-Anlage steigern. Für diese sind höhere Heizwasser-temperaturen nötig. Abwärme höherer Temperatur steht allerdings weniger häufig zur Verfügung, was die Anwendungsmöglichkeit von Multi-Effekt-AKM deutlich schmälert. Beim Umschalten auf freie Kühlung bei niedrigen Außentemperaturen tritt eine Reduzierung des thermischen Energiebedarfes auf. Die Berechnungen zeigen jedoch nur ein begrenztes Potenzial dieser Variante. Einer Reduzierung der thermischen Energie um bis zu 5 % bei freier Kühlung steht ein erhöhter Elektroenergiebedarf gegenüber. Der Prozess kann nur relativ selten in freier Kühlung betrieben werden, da bei Kältenutztemperaturen von +2 °C Außentemperaturen von ca. -2 bis -3 °C nötig sind. Diese Bedingungen (< -2 °C Außentemperatur) machen im Jahresverlauf jedoch nur einen Anteil von 5 % aus..

7.4.3.2 TEWI

In Abbildung 100 sind die TEWI-Emissionen der Industriekältesysteme dargestellt. Die direkten Emissionen bei den Kompressionssystemen spielen eine weitaus geringere Rolle als bei der Gebäudeklimatisierung. Ursache ist die hohe Zahl der Vollbenutzungsstunden. Für den direkten TEWI-Wert ist neben der Leckage die Kältemittelfüllmenge entscheidend. Diese wurde nach Literaturangaben (Wobst et al. 2003) sowie Auswertung von Einzelanlagen mit 0,5 kg/kW für Kaltwassersätze, und 0,7 kg/kW für die direktverdampfenden Systeme festgelegt. Letztere

sind jedoch sehr von der Anwendung und der damit notwendigen Verdampferbauart abhängig und kann um Faktoren größer ausfallen.

Abbildung 100: TEWI unterschiedlicher Industriekältesysteme für verschiedene Klimaszenarien



Unter den getroffenen Annahmen führt das direktverdampfende System mit dem Kältemittel R723 zu den geringsten TEWI-Emissionen. Auch bei Verwendung des fluorierten Kältemittels R134a lassen sich Vorteile gegenüber einem indirekten System erreichen. Diese Ergebnisse sind jedoch stark vom Einsatzfall abhängig. Wesentliche Faktoren, welche das TEWI-Ergebnis von direktverdampfenden Systemen mit HFKWs verschlechtern, sind:

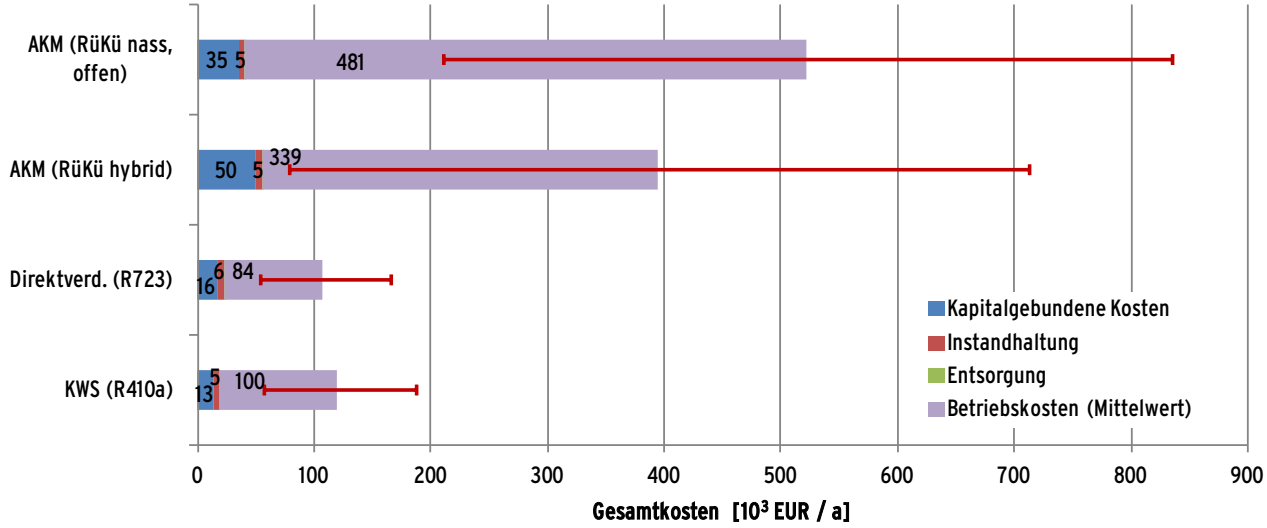
- Größere Leckraten gegenüber indirekten Systemen aufgrund
    1. umfangreicher Kältemittelleitungsinstallation vor Ort
    2. größerer Füllmenge
- Druckverluste in langen Saugleitungen mit Verschlechterung der Kälteleistungszahl aufgrund des höheren Druckverhältnisses am Verdichter
- notwendige Leistungsreglung bis zur minimalen Teillast aufgrund fehlender Möglichkeit der Kältespeicherung

Der Wärmebedarf der Absorptionskältesysteme führt im Vergleich zu den höchsten TEWI-Emissionen, sofern dieser aus KWK-Anlagen gedeckt und nach Stromverlust- oder Wirkungsgradmethode bewertet wird. Berücksichtigt man im Fall von Erdgas-basierten KWK-Anlagen den Verdrängungsmix (siehe Abbildung 22, Seite 61) oder stellt die Wärme ein Abfallprodukt aus anderen Prozessen dar, werden durch den Einsatz von AKM die geringsten TEWI-Emissionen verursacht. Verglichen mit Kompressionskältesystemen zeigt sich hier das Klimaschutzpotenzial von Absorptionskälteanlagen, dessen Emissionen etwa 40 % unter denen des direktverdampfenden Systems mit R723 und etwa 33 % unter denen eines Kaltwassersatzes liegen.

7.4.3.3 Kosten Kältesysteme

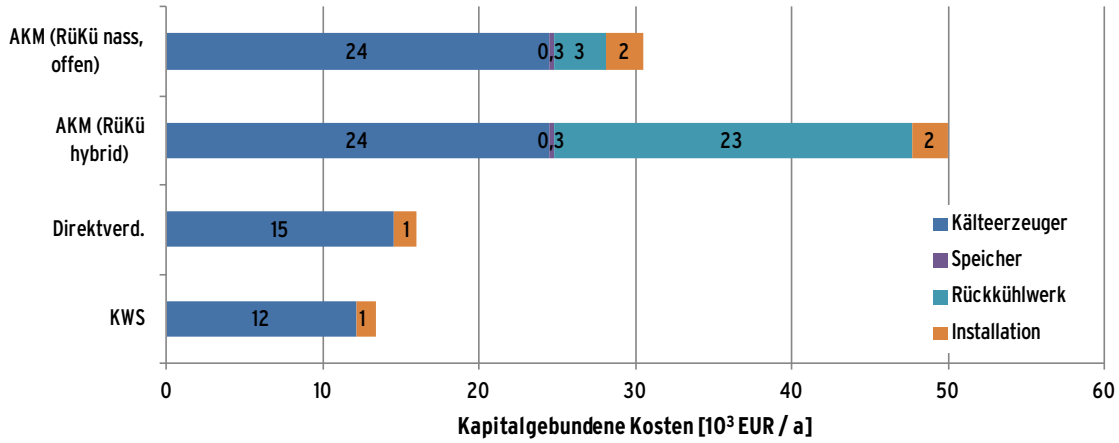
Im Bereich der Prozesskälte muss ganzjährig Kälte bereitgestellt werden. Hierdurch ergibt sich ein hoher Anlagennutzungsgrad und damit an umgekehrtes Verhältnis von Investitionskosten zu Betriebskosten verglichen mit den Ergebnissen aus dem betrachteten Beispiel zur Gebäudeklimatisierung. Wie in Abbildung 101 erkennbar ist, dominieren die Betriebskosten. Dadurch hat eine Variation der spezifischen Kosten für Strom, Wasser und Wärme einen erheblichen Einfluss auf die Gesamtkosten (angedeutet durch die Fehlerindikatoren in der Abbildung). Instandhaltungs- und Entsorgungskosten haben bei dieser Betrachtung nahezu keinen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Systeme.

Abbildung 101: Jahresgesamtkosten untersuchter Kältesysteme für den Bereich Industriekälte – für die Betriebskosten ist jeweils ein Mittelwert zu allen Kosten- und Klimaszenarien aufgeführt. Das Spektrum der Betriebskosten - generiert durch die Betrachtung verschiedener Kostenszenarien – wir durch die Fehlerbalken ersichtlich.



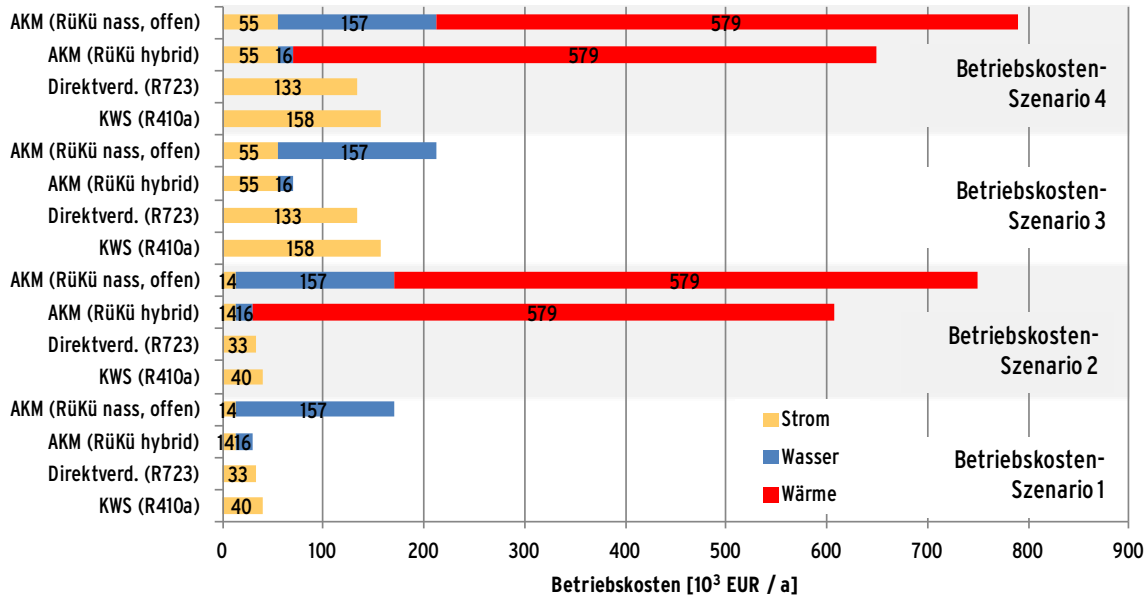
Auch wenn die Investitionskosten nur zu einem geringen Anteil zu den Gesamtkosten beitragen, sind diese für einzelnen Kältesystem sehr unterschiedlich (siehe auch Abbildung 102). Wie auch bei den Betrachtungen zur Gebäudeklimatisierung festzustellen war, verursacht der Kälteerzeuger der AKM-Systeme in etwa die doppelten Investitionskosten wie die Systeme mit Kompressionskälte. Die Betrachtungen beinhalten zudem einen Vergleich zweier verschiedener Rückkühlsysteme (Hybrid- und offener Nasskühlturm). Die Investitionskosten des Nasskühlturms sind deutlich geringer. Aufgrund eines höheren Wasserverbrauchs und damit verbundenen höheren Betriebskosten ergeben sich allerdings Nachteile in der Gesamtkostenbetrachtung.

Abbildung 102: Zusammensetzung der Investitionskosten der verschiedenen Kältesysteme



In Abbildung 103 ist die Zusammensetzung der wesentlichen Betriebskostenkomponenten dargestellt. Bei hohen Wärmebereitstellungskosten (Szenario 2 und 4; s. Tabelle 16 auf S. 114) arbeitet ein AKM-System wesentlich unwirtschaftlicher als vergleichbare Kompressionskälte-Systeme. Im Gegensatz dazu erlauben geringe bzw. keine Wärmebereitstellungskosten (Szenario 1 und 3; s. Tabelle 16 auf S. 114) einen wirtschaftlicheren Betrieb. Dies setzt allerdings die Verwendung eines hybriden und wassersparenden Rückkühlwerkes voraus. Die höheren Investitionskosten dieses Systems werden dann durch geringe Betriebskosten überkompensiert.

Abbildung 103: Zusammensetzung der Betriebskosten für die verschiedenen Kostenszenarien (Klima: FM)



7.4.4 Ergebnisdiskussion Einzelsysteme

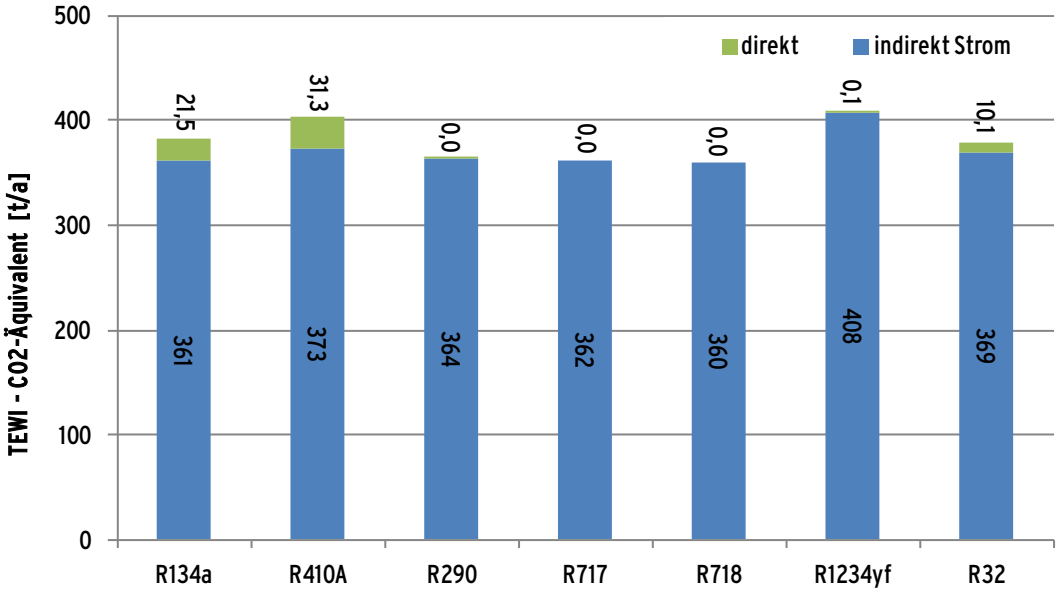
7.4.4.1 Variante 5: KWS - Kaltwassersatz

Wie bereits aus den Betrachtungen zur Gebäudeklimatisierung ersichtlich wurde, sind sowohl die direkten als auch die indirekten TEWI-Werte eines Kältesystems zum Teil sehr stark von der Wahl des Kältemittels abhängig. Es wurde bereits hervorgehoben, dass die Auslastung des Kältesystems den relativen Anteil des direkten und indirekten TEWI stark beeinflusst. Beides

lässt sich mit den Ergebnissen zur Industriekältebereitstellung noch einmal verdeutlichen (siehe Abbildung 104). Durch eine hohe Auslastung der Anlagen (ganzjähriger Betrieb) ist der indirekte TEWI-Anteil (Elektroenergiebedarf) verhältnismäßig hoch. Der direkte Anteil beträgt dann, je nach verwendetem Kältemittel, weniger als 10 % (im Vergleich zu ca. 40 % bei der Gebäudeklimatisierung, siehe Abbildung 81). In Hinblick auf die Vermeidung treibhauswirksamer Gase muss besonders bei Anwendungsfällen mit hohem Anlagennutzungsgrad auf hohe Effizienzwerte der Kälteanlage und damit auf eine durchdachte und angepasste Anlagenauslegung sowie eine abgestimmte Auswahl von Komponenten geachtet werden.

Allerdings ist auch ein relativ kleiner direkter TEWI von 10 % nicht zu vernachlässigen. In dem betrachteten Fall (ganzjährige Bereitstellung einer Kälteleistung von 500 kW) entspricht dies einer jährlichen Emission von ca. 30 t CO_2-Äquivalenten. Ein einfacher Vergleich vermittelt eine Vorstellung zur Höhe dieses Betrages: unter Berücksichtigung des deutschen Strommixes (spezifische CO_2-Emission bei der Erzeugung elektrischen Stroms 583 g/kWh) führt die Erzeugung einer Strommenge von ca. 51.500 kWh zu einer vergleichbaren CO_2-Emission. Der Einsatz von Kältemitteln mit niedrigem GWP-Wert bzw. das deutliche Reduzieren der Leckraten birgt auch im Industriekältebereich ein signifikantes Einsparpotenzial für treibhauswirksame Kältemittelemissionen.

Abbildung 104: TEWI-Betrachtung für Kaltwassersatz mit unterschiedlichen Kältemitteln für das Klimaszenario Frankfurt mittleres Jahr



7.4.4.2 Variante 6: AKM – BHKW-abwärmegetriebene Absorptionskältemaschine

Im Abschnitt zum Energiebedarf (7.4.3.1) wurde der hohe Wärmebedarf von AKM benannt. Eine Ursache dafür liegt in der Effizienzcharakteristik einer einstufigen Absorptionskältemaschine. Das Wärmeverhältnis zwischen Kälteleistung und Heizleistung steigt mit wachsender treibender Temperaturdifferenz anfangs steil an (F. Storkenmaier et al. 1999). In der Nähe der Nennbedingungen wird der Anstieg flacher. Es kommt trotz steigenden Potenzials zu keiner Verbesserung des Wärmeverhältnisses. Die beiden folgenden Abbildungen stellen dieses Verhalten exemplarisch dar.

Abbildung 106 zeigt den Verlauf des Wärmeverhältnisses für konstante Kalt- und Heizwassereintrittsbedingungen und variierender Kühlwassereintrittstemperatur. Unterhalb einer Kühlwassereintrittstemperatur von 30°C steigt das Wärmeverhältnis nur noch minimal an. Demgegenüber steigt die Effizienz von Kompressionskälteanlagen mit sinkender Außentemperatur linear an. Begrenzender Faktor ist hier der notwendige Mindestdruck für das Expansionsventil.

Abbildung 105: Schematischer Verlauf von Kälte- und Heizleistung sowie dem Wärmeverhältnis über der totalen treibenden Temperaturdifferenz

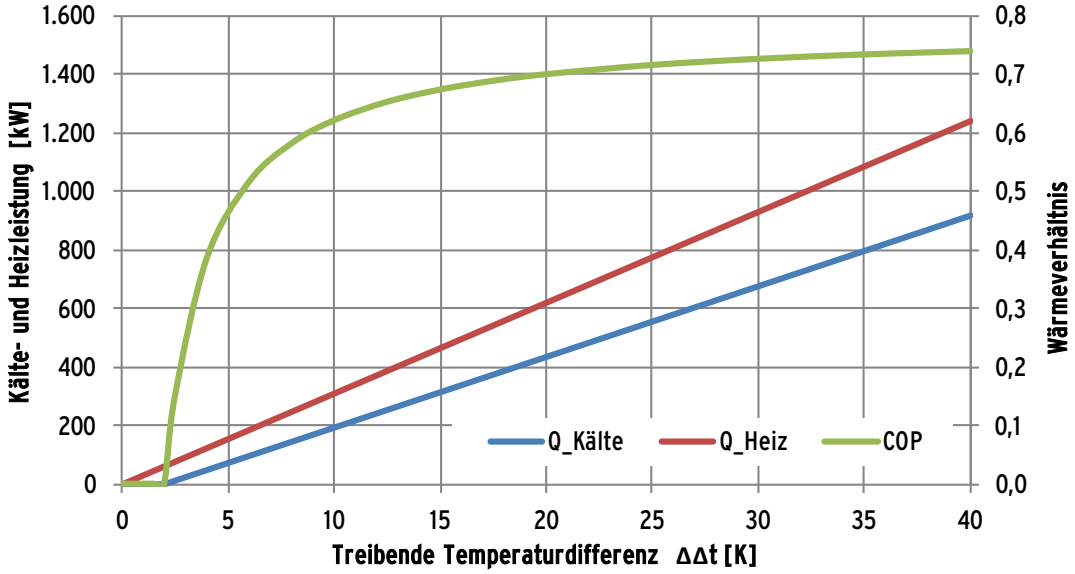
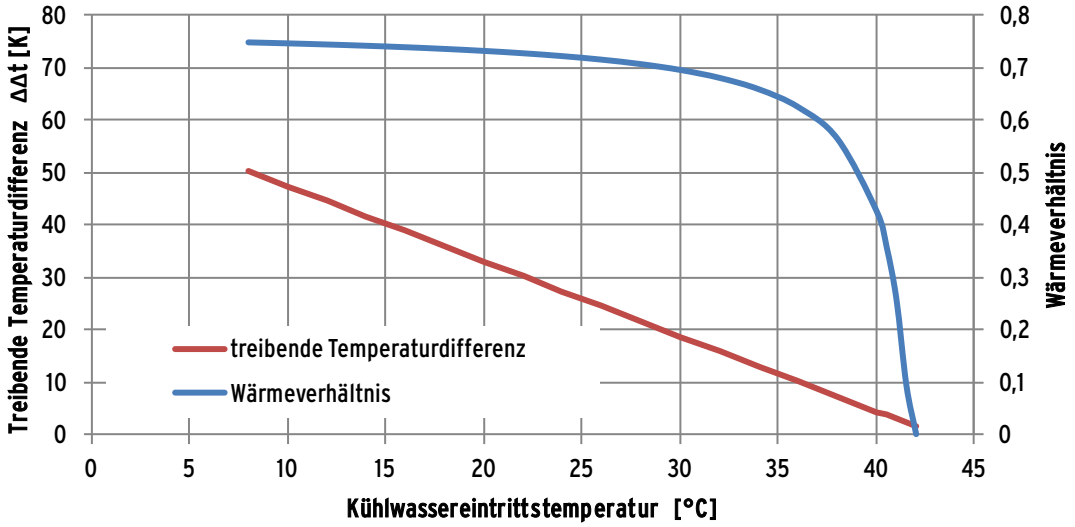


Abbildung 106: Schematischer Verlauf der treibenden Temperaturdifferenz und des Wärmeverhältnisses am Beispiel einer Wasser/LiBr-Absorptionskältemaschine (tKaW,ein = 4 °C, tHW,ein = 90 °C)



Bei Verfügbarkeit von Wärme höherer Temperatur kann der Bedarf durch den Einsatz einer H_2O-LiBr-Multieffektabsorptionskälteanlage mit Einsatz eines Resorbers anstelle des Verdampfers (Verdampfungstemperaturen unter 0°C möglich) reduziert werden. Mit solchen Anlagen sind Wärmeverhältnisse von 1,1 möglich (vgl. das Wärmeverhältnis der bei der Industriekälte verwendeten NH_3-H_2O-Absorptionskälteanlage liegt bei durchschnittlich 0,6). Der Wärmebedarf kann hierbei nahezu halbiert werden.

7.5 Schlussfolgerungen

7.5.1 Gebäudeklimatisierung

Die geringe Anzahl an Vollbenutzungsstunden (z.B. ca. 460 h für das Szenario F_M, entspricht einer Anlagenauslastung von 5%) für den Betrieb von Kältesystemen in den betrachteten Klimaregionen, führen zu einem bemerkenswerten Bild hinsichtlich des Verhältnisses von direkten und indirekten TEWI-Emissionen. Durch den insgesamt geringen Strombedarf, verursacht durch geringe Betriebszeiten der Anlage ist der indirekte Anteil der Emissionen, verglichen mit anderen Kälteanwendungen (z.B. Gewerbekälte) sehr klein.

Daraus folgt für solche Systeme die besondere Bedeutung eines geringen GWP des eingesetzten Kältemittels sowie eine guten Anlagendichtheit. Die Verwendung von natürlichen Kältemitteln mit geringem GWP-Wert ist in Kaltwassererzeugern möglich und wird von einigen Herstellern angeboten (z.B. Frigoteam). Problematisch sind VRF-Systeme. Die Brennbarkeit von Kältemitteln mit geringerem GWP schränkt die Akzeptanz im Gebäudebereich erheblich ein. Nicht brennbare, natürliche Hochdruckkältemittel als Alternative zu R410A sind nur wenige verfügbar. Der Einsatz von CO_2 als Kältemittel ist möglich, ein VRF-System mit diesem Kältemittel wurde entwickelt und zur Marktreife gebracht (DAIKIN 2008). Kritisch bleibt die mögliche CO_2-Anreicherung in der Raumluft bei Leckage am Innengerät. Die erreichbare Energieeffizienz bleibt deutlich hinter der der konventionellen Anlagenvariante zurück (DAIKIN 2008).

Raumlufttechnische Anlagen mit DEC-System erreichen nur geringe Temperaturdifferenzen zwischen Zu- und Abluft. Der Kältebedarf muss somit durch hohe Luftvolumenströme gedeckt werden. Gleichzeitig wird die Zuluft geregelt entfeuchtet. Dies führt zu großen Energieaufwendungen. Das DEC-System kann jedoch dann vorteilhaft sein, wenn eine Anwendung ohnehin hohe Luftwechselraten und eine geregelte Entfeuchtung erfordert. Durch eine Kombination mit Kompressionskälte, z.B. in Verbindung mit Kühldecken, ließen sich Lastspitzen besser abdecken.

7.5.2 Industriekältebereitstellung

Ähnlich wie in der Gebäudeklimatisierung zeigt sich auch hier ein Ergebnis, welches stark von den Randbedingungen zum Bedarf und der Bewertung geprägt ist.

Steht Abwärme, welche sonst nicht genutzt werden kann, mit ausreichendem Temperaturniveau (>85°C) zu Verfügung, können mit einer Absorptionskälteanlage große Mengen an Elektroenergie eingespart werden. Handelt es sich um Wärme, welche anderweitig zum Heizen oder prozesstechnisch genutzt werden kann, sind Kombinationsmöglichkeiten denkbar. Hierbei können die Vorteile der Einzelsystemen genutzt werden: Nutzung der im Sommer nicht benötigten Abwärme durch eine Absorptionskälteanlage, Nutzung der hohen Effizienz einer Kompressionskälteanlage im Winterzeitraum.

Der Vergleich von direkt- und indirekt-verdampfenden Systemen hängt stark von den technischen Randbedingungen ab. Unter günstigen Bedingungen wie konstanter Kältelast und naher Aufstellung der Kältemaschine am Bedarfsort sind mit direktverdampfenden Systemen energetisch wie ökologisch Vorteile zu erzielen. Der Einsatz von natürlichen Kältemitteln ist aufgrund der viel geringeren direkten TEWI-Emissionen vorzuziehen.

Unter Bedingungen mit starken Bedarfsschwankungen über einen weiten Bereich oder entfernter Aufstellung vom Bedarfsort bieten indirekt-verdampfende Systeme Vorteile. Durch die hierdurch möglichen Vorteile, wie geringere Kältemittelmenge oder kleine saugdruckseitige Verluste zwischen Verdampfer und Verdichter, sind aus ökologischer wie wirtschaftlicher Sicht Vorteile zu erzielen. Insbesondere die Möglichkeit der Entkopplung von Kältebedarf- und -bereitstellung spricht unter reglungstechnischen Gesichtspunkten sowie dem zunehmenden Anteil regenerativer Energien für diese Systeme. Indirekt-verdampfende Systeme lassen sich sehr gut mit Absorptionskältemaschinen kombinieren. Verschiedene Betriebsweisen (Einzelbetrieb, Parallelbetrieb) sind in diesem Fall möglich.

Für die Verwendung natürlicher Kältemittel spricht neben den geringen GWP-Werten auch deren hier rechnerische ermittelte und in der Praxis bestätigte energetische Effizienz. Gegenüber R134a liefern die Kältemittel R290, R717 und R718 einen nahezu identischen Elektroenergiebedarf (Abweichungen kleiner 1 %). Vergleicht man die Werte mit dem Einsatz von R410A ergeben sich für die natürlichen Kältemittel eine Effizienzverbesserung von etwa 3 %. Demgegenüber steht ein Mehrbedarf an Elektroenergie von über 10 % beim Einsatz von R1234yf.

7.5.3 Allgemein

Die energetische Beurteilung der verschiedenen Techniken zur Kälteerzeugung liefert je nach Anwendungsgebiet ein differenziertes Bild. So schneiden direktverdampfende Systeme im Bereich der Gebäudeklimatisierung schlechter ab als Kaltwassersätze. Für den Bereich der Industriekältebereitstellung wiederum besitzen direktverdampfende Systeme teilweise deutliche Vorteile. Absorptionskältemaschinen haben einen vergleichsweise geringen Elektroenergiebedarf. Dem steht jedoch der große Bedarf an thermischer Energie gegenüber. Dies muss kein Nachteil sein, wenn eine sonst ungenutzte (Ab)Wärmequelle vorhanden ist.

Die Beispielrechnungen machen auch deutlich, dass generelle Aussagen zur Nachhaltigkeit unterschiedlicher Kältesysteme schwierig sind. Ein Vergleich kann immer nur für einen speziellen Anwendungsfall mit den jeweils gültigen Systemparametern und Randbedingungen gelten. Allerdings ist folgendes aus den gewonnen Erkenntnissen zu schlussfolgern:

- Die generelle Vermeidung des Einsatzes von Klimakälte sollte bei der Projektierung von Gebäuden und Industrieanlagen oberste Priorität haben.
- Bei der Notwendigkeit des Einsatzes von Kälteanlagen sind natürliche Kältemittel den synthetischen Varianten vorzuziehen.
- Bei einer ungünstigen Auswahl bzw. Auslegung der Systeme können aufgrund niedriger Effizienzwerte besonders hohe TEWI-Werte zustande kommen. Bei Anlagen mit hoher Auslastung (hohe Vollbenutzungsstundenanzahl) kann die Auslegung einen stärkeren Einfluss auf den Gesamt-TEWI haben als die Wahl des Kältemittels.
- Umgekehrt zeigen die Berechnungen, dass bei Anlagen mit einer geringeren Anzahl an Vollbenutzungsstunden nicht von der Energieeffizienz auf die Klimaverträglichkeit der einzelnen Systeme geschlossen werden kann. So gilt für Kompressions-Kältesysteme: die Leckrate im Kältekreislauf hat beim Einsatz fluorierter Kältemittel mit hohem GWP,einen wesentlichen Einfluss auf den TEWI. Bei hohen Leckraten hat eine Effizienzsteigerung im Kältesystem (z.B. durch die Ergänzung mit einem Kaltwasserspeicher in der Gebäudeklimatisierung) nur einen verhältnismäßig geringen

Einfluss. Deswegen ist den Leckraten und den Verfahren zur Auffindung bzw. Vermeidung solcher ein hoher Stellenwert beizumessen (Thema Grenzwerte und deren Überprüfung in der Praxis).

- Die Nutzung ohnehin vorhandener und sonst ungenutzter Abwärme kann beim Einsatz einer AKM den TEWI deutlich reduzieren

8 Substitution von Kälteerzeugungssystemen durch wärmegetriebene Systeme (Szenarien)

Die Ergebnisse der Analysen im vorangegangen Kapitel 7 haben gezeigt, dass durch den Einsatz von Ab- und Adsorptionskältemaschinen bei vorhandenen, bisher ungenutzten Abwärmequellen eine Reduktion der TEWI-Emissionen erreicht werden kann.

Ab- und Adsorptionskälteanlagen benötigen hauptsächlich thermische Antriebsenergie zur Kälteerzeugung. Durch deren Einsatz kann der Elektroenergiebedarf für die Kälteerzeugung gesenkt werden.

Bei Einsatz ungenutzter Abwärme oder Umweltenergie werden Primärenergieeinsparungen für die Kälteerzeugung erreicht.

Bei der Wärmenutzung aus Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen sind Primärenergieeinsparungen und CO_2-Emissionsminderungen möglich. Beim Einsatz von Erdgas als Brennstoff in GuD-Anlagen oder in BHKWs werden durch die verdrängte Stromproduktion ebenfalls CO_2-Emissionen eingespart. Für Kohlekraftwerke mit Wärmeauskopplung ist der Einzelfall zu prüfen (siehe Abschnitt 4.2.10) Da Kraft-Wärme-Kopplung häufig durch mangelnden Wärmebedarf eingeschränkt ist, kann die Sorptionskältetechnik einen Beitrag zur Wirtschaftlichkeit solcher Systeme leisten.

Im vorliegenden Kapitel wird die Substitution von Kompressionskältesystemen durch wärmegetriebene Systeme untersucht. Ziel ist eine Abschätzung, welche Anteile des Kältebedarfs durch Ab- und Adsorptionskälteanlagen in den untersuchten Branchen gedeckt werden können.

Als Grundlage dienen die in Kapitel 5 gesammelten Daten zum Kältebedarf und dessen Charakteristik bezogen auf die einzelnen Branchen. Neben den Daten zum Kältebedarf sind vorhandene Abwärmepotenziale aus industriellen Prozessen sowie aus einer möglichen KWK-Stromerzeugung relevant. Ein Teil dieser Daten wurde bereits in Kapitel 5 dargestellt. Dieser Teil wird durch weitere Angaben im vorliegenden Kapitel ergänzt.

Für die Potenzialschätzung werden zwei Varianten mit unterschiedlichen Randbedingungen untersucht:

- Nutzung vorhandener Abwärmequellen als Antriebswärme
- Nutzung von vorhandenen bzw. nachzurüstenden KWK-Anlagen auf Erdgas-Basis

Ideal ist hierbei, wenn vorhandene ungenutzte innerbetriebliche Abwärme mit einem ausreichenden Temperaturniveau oder Wärme von einer solarthermischen Anlage zur Deckung des Kältebedarfs genutzt werden kann. Gegenüber Kompressionskälteanlagen weisen wärmegetriebene Kältesysteme höhere Investitionskosten auf. Zur finanziellen Amortisation sind daher ausreichend hohe Auslastungsgrade notwendig. Neben den Investitionskosten für die Absorptionskältemaschine, kommen bei der Nutzung von Abwärme weitere Kostenfaktoren an, wie z.B. aufwendige Abgaswärmetauscher, Kälte oder Wärmespeicher zum Tragen.

Ein Beispiel soll zur Verdeutlichung dienen. Unter den Milchviehbetrieben finden sich zahlreiche Höfe, welche die anfallende Biomasse in Biogas umwandeln. Das Biogas wird mit einem BHKW in Strom umgewandelt. Die Wirtschaftlichkeit eines solchen Systems wird erst durch hohe Betriebsstundenzahlen und ausreichende Wärmeabnahme erreicht. Das Problem vieler

Anlagen ist der nicht vorhandene Wärmebedarf in der warmen Jahreszeit. Daneben existiert aber ein Kältebedarf, z. B. für die Sturzkühlung mit ausgeprägter Lastspitze und die Lagerung der Milch.

Die Auslegung einer Absorptionskältemaschine auf die im Moment der Sturzkühlung benötigte Kälteleistung führt zu einer sehr großen Anlage mit einer geringen Auslastung. Eine solche Anlage ist wirtschaftlich nicht darstellbar und führt auch für das Biogas-betriebene BHKW nicht zu einer wesentlichen Anhebung der Laufzeiten. Eine ausreichend hohe Wärmeleistung von Seiten des BHKW steht ebenfalls nicht zur Verfügung. Alternativ bietet sich bei der vorliegenden Charakteristik die Wahl einer kleinen Absorptionskältemaschine in Verbindung mit einem Kältespeicher an. Hierdurch wird die Kältebereitstellung dem Kältebedarf und die Kälteerzeugung dem Abwärmeanfall angepasst. Die Investitionskosten für einen Kältespeicher sind jedoch bei der Untersuchung der Wirtschaftlichkeit zu berücksichtigen.

8.1 Potenzial - Nutzung von vorhandener Abwärme zur Kälteerzeugung

Soll Abwärme zur Kälteerzeugung genutzt werden, spielen das Temperaturniveau der Abwärme, der Kältebedarf, die zeitliche Verfügbarkeit der Wärmequelle und die zeitliche Aufteilung des Kältebedarfs eine wichtige Rolle. Bei der Analyse der Abwärmequellen in einzelnen Industriebereichen ist eine starke Verallgemeinerung notwendig. Die Vorgehensweise zur Charakterisierung der Abwärme- und Kältequellen basiert auf der Auswertung von Fallbeispielen und Literaturquellen. Darüber hinaus müssen u.a. folgende Annahmen zum Ablauf von Prozessen in einzelnen Industriezweigen getroffen werden:

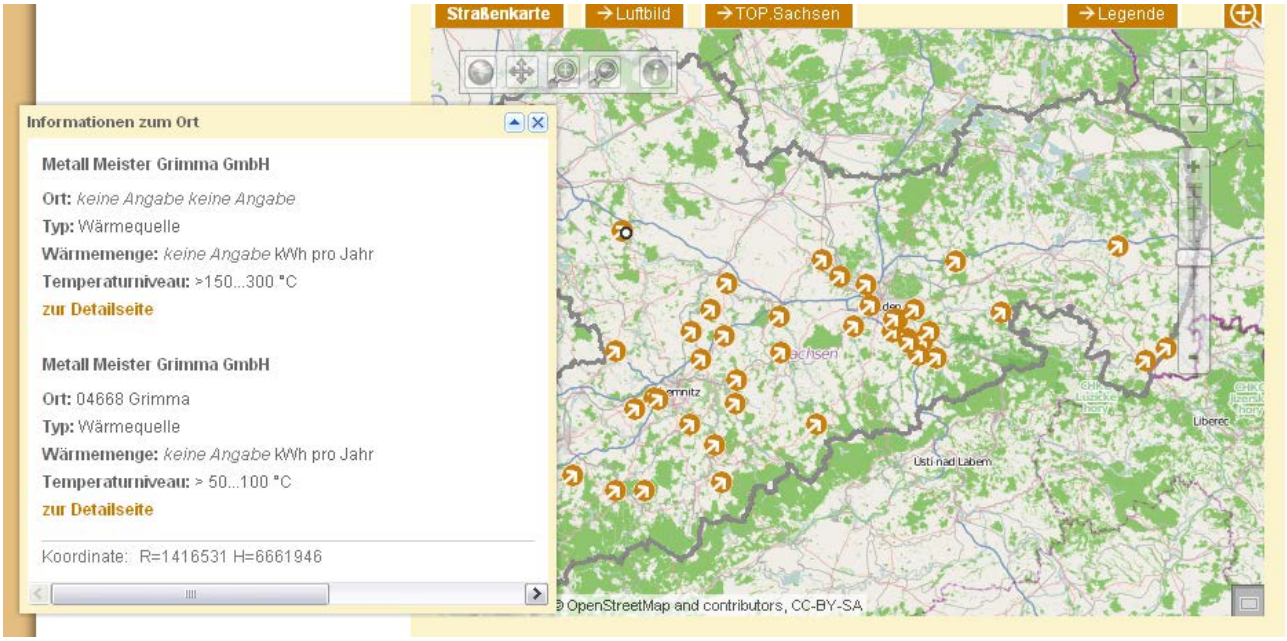
- Die Abgastemperatur von Industrieöfen (z.B. Schmelz- oder Glühöfen) wird mit unter 300 °C angenommen. Oft liegen höhere Abgastemperaturen vor, jedoch sind heute hocheffiziente Brennertechnologien verfügbar, welche Wirkungsgrade von bis zu 85 % ermöglichen (MIOBA 2012). Die sogenannten Regenerativ-Brenner ermöglichen durch paarweisen, diskontinuierlichen Betrieb eine Auskühlung der Abgase auf unter 300°C. Eine Effizienzsteigerung der Öfen durch Nachrüstung sollte einer weiteren Abwärmenutzung vorausgehen.
- In der Maschinenbaubranche kommen zahlreiche Produktionsprozesse zum Einsatz. Die als Abwärmequellen zu betrachtenden Prozesse umfassen z.B. Verfahren der Metallbearbeitung (Schweißen, Löten, Warmumformung) oder der Oberflächenbehandlung (Reinigungsbäder, Galvanik, Lackierung). Bei einer hohen Anzahl kleiner und mittelständiger Betriebe kommen diese Prozesse in unterschiedlichster Art und Häufigkeit zur Anwendung. Angaben hierzu sind daher nur bedingt zu Verallgemeinern. Als Konsequenz wird der mögliche Realisierungsgrad als vergleichsweise gering eingeschätzt.

Ein Großteil der Literaturquellen wurde bei der Erfassung und Diskussion des Kälte- und Energiebedarfs in den Abschnitten 5.4, 5.5, 5.6 genannt. Für Fallbeispiele wird auf ein Projekt der sächsischen Energieagentur SAENA hingewiesen. Die SAENA erstellte einen Abwärmeatlas für das Land Sachsen. Hier können Firmen ihre Abwärmequellen eintragen. Für den Nutzer sind auf der Karte Standort, Wärmequelle, Wärmemenge und Temperaturniveaus ersichtlich (SAENA 2010).

Vor einem ähnlichen Hintergrund untersucht das Frauenhofer UMSICHT Institut die Implementierung von Abwärmeverbundsystemen in industriellen Gewerbegebieten. Ziel des

Projektes ist der Aufbau eines solchen Verbundes und dessen dauerhaft wirtschaftlicher Betrieb. Abwärme kann so nicht nur von dessen Erzeugern, sondern auch anderen Akteuren im Verbund genutzt werden (Frauenhofer-UMSICHT 2013).

Abbildung 107: Ausschnitt aus dem Abwärmeatlas der Sächsischen Energieagentur - SAENA GmbH (rechts: Karte mit Standorten, links: Datenbankeintrag zu einem Standort) (SAENA 2010) www.energieportal-sachsen.de



In Tabelle 26 werden Kältebedarf und Abwärmeangebot unterschiedlicher Industriebereiche gegenübergestellt. Hierin erfasst werden die zeitlichen Schwankungen und die damit verbundene Notwendigkeit einer thermischen Speicherung. Dabei werden die benötigten Temperaturen für die Kälteerzeugung sowie die vorhanden Abwärmetemperaturen gegenübergestellt und es erfolgt eine Beurteilung des Verhältnisses von Kältebedarf zu vorhandenem Abwärmepotenzial. Darüber hinaus wird eine Einschätzung zum notwendigen Investitionsaufwand gegeben. Aus diesen Kenngrößen wird der Anteil wärmegetriebener Kälteerzeugung am gesamten Kältebedarf geschätzt. Die Möglichkeiten von Absorptions-Kompressionskaskaden werden berücksichtigt. Die Tabelle zeigt weiterhin das Potenzial wärmegetriebener Kältesysteme in unterschiedlichen Branchen. Unterschiedliche Betriebsgrößen und Verfahrensabläufe an unterschiedlichen Standorten werden ebenfalls berücksichtigt. Das Produkt aus den prozentualen Anteilen am Kältebedarf und der Realisierungsmöglichkeit entspricht der erreichbaren Deckung des Kältebedarfs durch wärmegetriebene Kältesysteme. Diese wird mit dem bereits bestehenden Anteil verrechnet. Hieraus resultieren die zusätzlich durch Ab- und Adsorptionskälteanlagen leistbare Kältebedarfsdeckung sowie die damit verbundenen Einsparungen an Elektroenergie.

Die Schätzungen der Anteile entsprechen einem konservativen Szenario. Als Ausschlusskriterien wurden nicht ausgereifte bzw. nicht verfügbare Techniken sowie höhere Investitionskosten wurden für die Anwendung wärmegetriebener Kältesysteme gewertet. Die Einbeziehung von in Zukunft verfügbaren Kältespeichersystemen wird den Deckungsbeitrag der wärmegetriebenen Kälteerzeugung vergrößern.

Tabelle 26: Bewertung des Kältebedarfs sowie der Abwärmequellen - Schätzung des einzusparenden Strombedarfs durch Nutzung von wärmegetriebenen Kältesystemen

Branche			Kältebedarf		Abwärme				Bewertung und Schätzung					Resultat		
Hauptgruppe	Nebengruppe	Untergruppe	Kältetemperatur [°C]	Kältebedarfs-charakteristik (saisonal/ täglich)	Abwärmequellen	Mengenverhältnis Abwärme / Kälte	Abwärmetemperatur [°C]	Abwärme-charak-teristik (saisonal/ täglich)	erfordert Speicherung	Schätzung Anteil am Kältebedarf	Investitionsbedarf	möglicher Realisierungsgrad	Produkt Anteil x Realisierungsmöglichkeit	resultierender zusätzlich durch AKM gedeckter Kältebedarf [GWh/a]	Anteil am bisherigen KK-gedecktem Kältebedarf	Einsparpotenzial Endenergie Strom [GWh/a]
Industriekälte	Bergbau, Gewinnung von Steinen und Erden (nur Steinkohleabbau)		3	konstant / konstant	Maschinen, Grubengas	<<	0	konstant / konstant	nein	0%	-	0%	0%	0	0%	0
	Papier- und Zellstoffindustrie		6	schwankend / konstant	Maschinen	>	50...100	konstant / konstant	nein	30%	mittel	30%	9%	23	9%	8
	Druckindustrie		20	schwankend / konstant	Maschinen, Papierrollen, Trockner (sehr hohe Kühltemperaturen möglich, eventuell Ausbindung der Hochtemperaturwärme), Nachbrennungswärme	>	50...200	konstant / konstant	nein	50%	mittel	30%	15%	63	10%	5
	übrige chemische Industrie ohne Luft- und Gasverflüssigung		-4	konstant / konstant	Nachverbrennungsprozesse, Reaktionswärmen, Rauchgase	>	50...200	konstant / konstant	nein	30%	gering	70%	21%	411	8%	152
	übrige chemische Industrie: nur Luft- und Gasverflüssigung		-190	-	Verdichterabwärme, Wärme der verdichteten Luft	>	50...500	konstant / konstant	nein	0%	hoch	0%	0%	0	0%	0
	Pharmazeutische Industrie		6	konstant / konstant	Reaktionswärmen, Rauchgase	>	50...200	konstant / konstant	nein	30%	gering	50%	15%	54	6%	14
	Kunststoff- und Gummiverarbeitung		6	konstant / zyklisch	Rauchgasabwärme der Wärme-erzeuger, Wärme der Kunst-stoffprodukte und Maschinen (>200°C aber schwer nutzbar)	<=	50...100	konstant / zyklisch	ja	20%	hoch	10%	2%	56	2%	28
	Bau- und Baustoffindustrie		-25	schwankend / konstant	Motorenabwärme u. Rauchgase v. Arbeitsmaschinen u. dezentr. Stromversorgungskomponenten	<	50...100	konstant / konstant	nein	0%	hoch	0%	0%	0	0%	0
	Elektro- und Elektronikindustrie (auch Leiterplattenfertigung und Löten, Halbleiterfertigung)		5	schwankend / konstant	Abwärme aus Eigenstrom-versorgung (insbesondere Halbleiter-fertigung)	<=	50...100	konstant / konstant	nein	80%	gering	80%	64%	23	7%	6

	Fahrzeugindustrie		6	schwankend / konstant	Prüfstände, Maschinenabwärme	<	<50	konstant / schwankend	ja	20%	hoch	30%	6%	22	1%	5
	Maschinenbau		6	schwankend / konstant	Prüfstände, Maschinenabwärme	<	<50	konstant / schwankend	ja	10%	hoch	30%	3%	30	3%	8
	Kompressoren, z.B. zur Druckluft-erzeugung, Drucklufttrocknung (mit Kältesystemen)		3	konstant / konstant	Verdichterabwärme, Wärme der verdichteten Druckluft	<=	50...100	konstant / konstant	nein	30%	mittel bis hoch	30%	9%	34	9%	8
	Prozesskälte (Flüssigkeitskühlsätze) für industrielle Anwendungen		6	schwankend / konstant	je nach Branche	?	50...200	?	0	10%	?	30%	3%	-5	0%	-1
	Schaltschrankkühlung		20	konstant / zyklisch	Wärme von Bauteilen (>70°C)	<=	50...100	schwankend / konstant	nein	20%	hoch	10%	2%	8	2%	6
Nahrungsmittelherstellung	Nahrungsmittel-industrie	Betriebe ab 50 Beschäftigte NK	0	konstant / zyklisch	Rauchgase von Wärmeversorgung, Schwaden (Backbetriebe)	<=	50...200	konstant / schwankend	ja	30%	hoch	20%	6%	208	4%	65
	Nahrungsmittel-industrie	Betriebe ab 50 Beschäftigte TK	-25	konstant / zyklisch	Rauchgase von Wärmeversorgung, Schwaden (Backbetriebe)	<=	50...200	konstant / schwankend	ja	30%	hoch	20%	6%	139	4%	93
	Nahrungsmittel-industrie	Betriebe 20...49 Beschäftigte NK	0	konstant / zyklisch	Rauchgase von Wärmeversorgung, Schwaden (Backbetriebe)	<=	50...200	konstant / schwankend	ja	30%	hoch	20%	6%	52	4%	20
	Nahrungsmittel-industrie	Betriebe 20...49 Beschäftigte TK	-25	konstant / zyklisch	Rauchgase von Wärmeversorgung, Schwaden (Backbetriebe)	<=	50...200	konstant / schwankend	ja	30%	hoch	20%	6%	35	4%	29
	Nahrungsmittel-industrie	Nebenprozesse NK	0	konstant / zyklisch	Rauchgase von Wärmeversorgung, Schwaden (Backbetriebe)	<=	50...200	konstant / schwankend	ja	30%	hoch	20%	6%	30	4%	12
	Nahrungsmittel-industrie	Nebenprozesse TK	-25	konstant / zyklisch	Rauchgase von Wärmeversorgung, Schwaden (Backbetriebe)	<=	50...200	konstant / schwankend	ja	30%	hoch	20%	6%	20	4%	18
	Brauereien		-7	konstant / zyklisch	Abwärme im Gärprozess	<=	50	konstant / schwankend	ja	30%	hoch	50%	15%	108	15%	41
	Milchviehbetriebe		4	konstant / zyklisch	Biogasverbrennungswärme	>	50...200	konstant / konstant	Kältespeicher	100%	hoch	20%	20%	210	20%	117
Gebäudeklimatisierung	Gewerbe Handel Dienstleistungen		6	schwankend / schwankend	Solarwärme / Fernwärme	<	50...100		möglich	50%	mittel	20%	10%	508	6%	175
	Industrie		6	schwankend / schwankend	siehe einzelne Branchen	<=	50...200		möglich	50%	mittel	20%	10%	1.644	9%	567

	Rechenzentren und Server	6	schwankend / schwankend	abhängig von Standort	<	50...100		möglich	20%	mittel	10%	2%	67	2%	23
	Haushalte	6	schwankend / schwankend	Solarwärme / Fernwärme	<	50...100		möglich	100%	hoch	5%	5%	36	5%	13
Summe													**3.776**		**1.412**

In Abbildung 108 ist der Kältebedarf in den einzelnen Branchen wiedergegeben. Zusätzlich dargestellt ist der bereits heute mit Ab- und Adsorptionskälteanlagen gedeckte Kältebedarf sowie der Anteil, der durch die Nutzung vorhandener Abwärme zusätzlich gedeckt werden kann (konservatives Szenario). Abbildung 109 zeigt die hiermit verbundenen erreichbaren Elektroenergieeinsparungen bezogen auf die Branchen.

Abbildung 108: Kältebedarf und gegenwärtiger bzw. perspektivischer Anteil der mit Abwärme angetriebenen Kältetechnik – Variante: Nutzung vorhandener Abwärme zur Kälteerzeugung

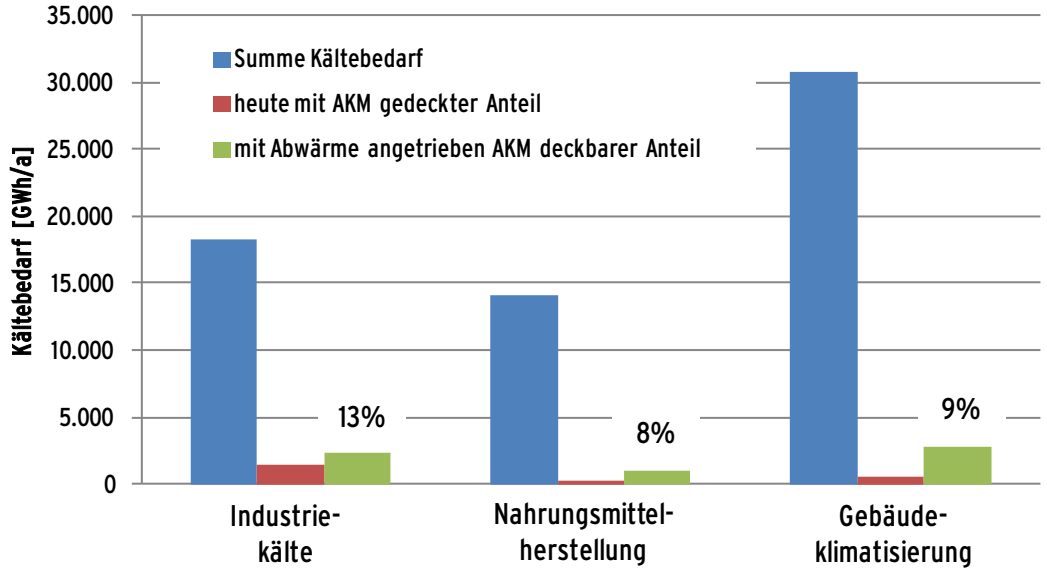
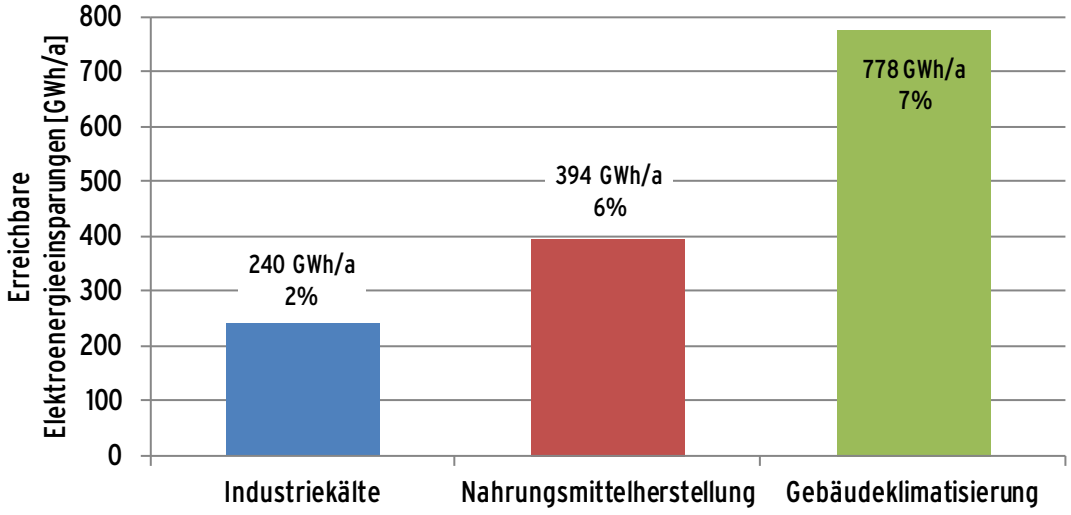


Abbildung 109: Erreichbare Elektroenergieeinsparungen in den einzelnen Branchen (Prozentanteile auf den Elektroenergiebedarf der Kälteerzeugung je Branche bezogen) - Variante: Nutzung vorhandener Abwärme zur Kälteerzeugung – Eigenbedarf Strom der AKM nicht berücksichtigt



8.2 Potenzial - Einsatz von Erdgas-betriebenen KWK-Anlagen

Der Einsatz von erdgasgetriebenen BHKWs führt durch Regelung der Einspeiserangfolge (EEG und KWKG) und durch Merit-Order-Effekte zu CO_2-Einsparung bei der Stromproduktion (siehe Abschnitt 4.2.10, Seite 59). Die Inanspruchnahme einer zusätzlichen Vergütung (KWK-Bonus)

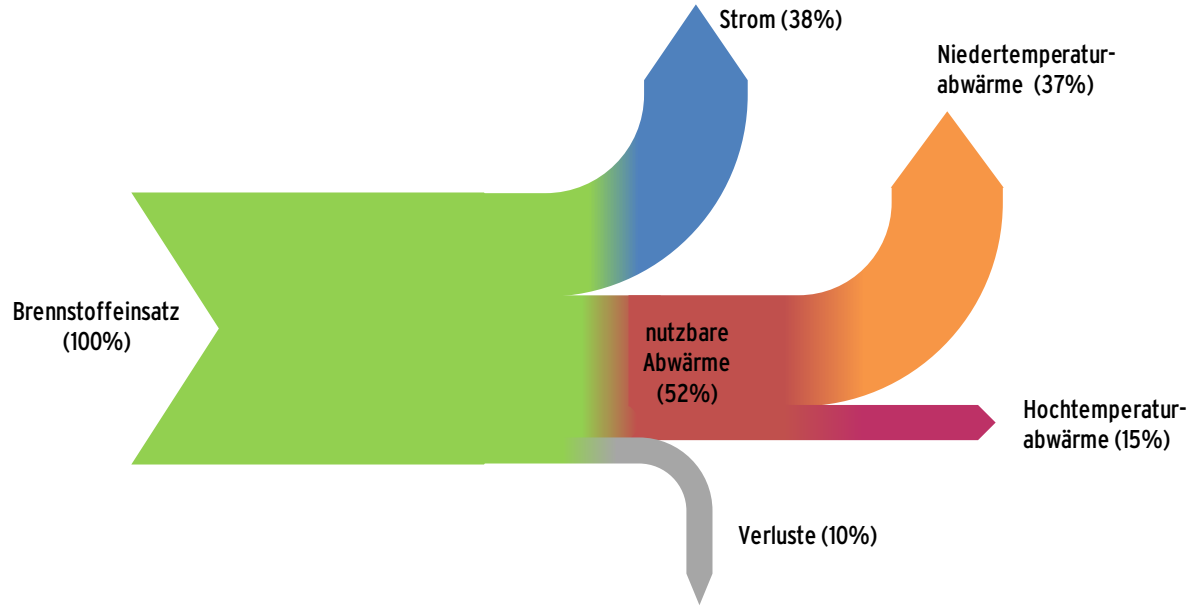
und der Einspeisevorrangregelung setzt die Nutzung der anfallenden Abwärme voraus (KWKG 2009).

BHKWs weisen zwei Abwärmeanteile auf. Die Motorabwärme, abgeführt über den Kühlkreislauf, weist mit ca. 60-80 % den größeren Anteil auf. Die Temperatur liegt zwischen 80 und 90 °C. Der zweite Abwärmeanteil von ca. 20-40 % liegt als Hochtemperaturabwärme im Abgasstrom vor. Die Temperaturen betragen hier ca. 500 °C (Abbildung 110).

Für den Absorptionsprozess bieten sich unterschiedliche Nutzungsmöglichkeiten

- Einbindung der gesamten Abwärme über ein Temperaturniveau in eine *Single-Effect*-AKM → geringere Investitionskosten verbunden mit geringerem Wärmeverhältnis
- getrennte Einbindung der Nieder- und Hochtemperaturabwärme in einer *Multi-Effect*-AKM → höhere Investitionskosten verbunden mit hohem Wärmeverhältnis

Abbildung 110: Typische Ausbeute des Brennstoffeinsatzes in einem BHKW



Die Einspeisevergütung des generieten Stroms setzt sich aus drei Bestandteilen zusammen:

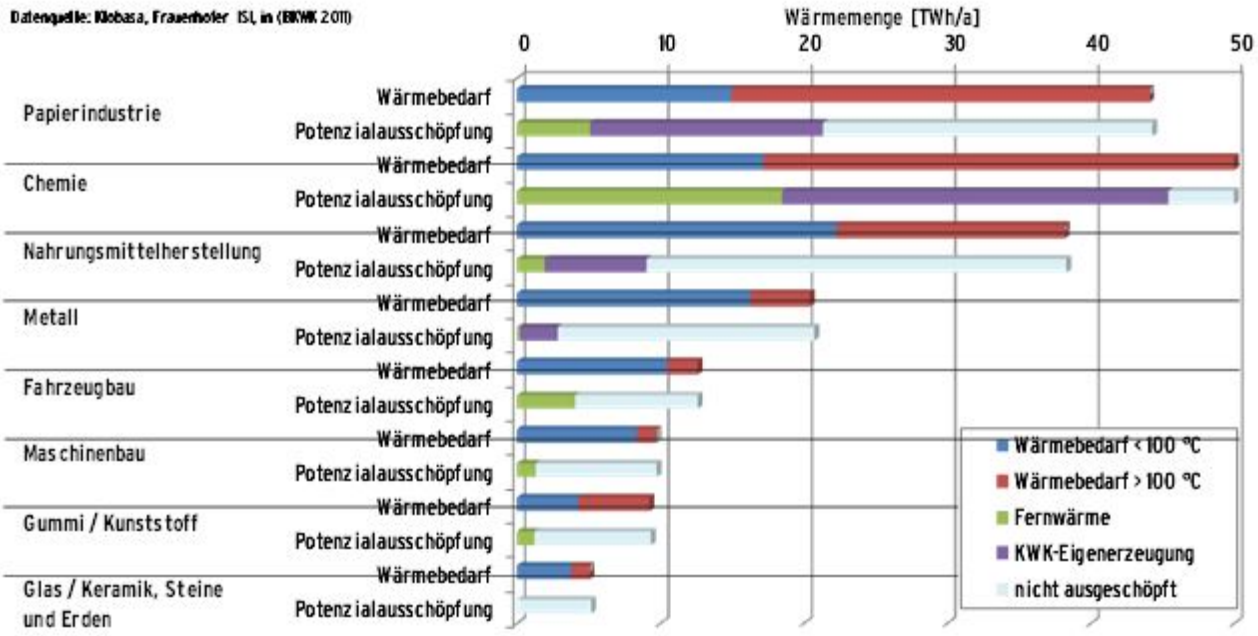
- „Baseload"-Preis, ausgehandelt mit dem Netzbetreiber oder Mittelwert des Grundlaststroms an der Strombörse EEX des letzten Quartals (Anschluss-, Abnahme- Vergütungspflicht nach KWKG)
- KWK-Zuschlag, abhängig von BHKW-Leistung, Nachweis der Wärmenutzung als Voraussetzung
- Erstattung vermiedener Netznutzungsentgelte (VNNE)

KWK-Zuschlag und VNNE bleiben erhalten, wenn der Strom betriebsintern genutzt wird. Die Einspeisevergütung entfällt. Einsparungen des BHKW-Betreibers sind dann vom Tarif des Strombezugs abhängig. Zu berücksichtigen sind mögliche Preisanstiege durch Minderabnahme bei (partieller) Eigenversorgung.

Die Amortisation einer BHKW-Installation ist an eine hohe Vollbenutzungsstundenzahl mit gleichzeitiger Abwärmenutzung gekoppelt (Ausschöpfung des KWK-Bonus). Bei ausgeprägtem saisonalem Kälteenergiebedarf sind weitere Wärmeabnehmer notwendig. Beispiele hierfür sind Heizungsbedarf in den Wintermonaten oder Prozesswärmebedarf. Dabei ist zu

berücksichtigen, dass bereits heute ein großer Anteil des Wärmebedarfs in der Industrie über KWK-Anlagen gedeckt wird (vgl. Abbildung 111). Dieses kann einerseits ein Anschlusskriterium sein, anderseits aber auch zu erhöhten Laufzeiten bestehender KWK-Anlagen führen. Dies ist der Fall, wenn der bisherige Wärmebedarf saisonal nicht synchron zum Kältebedarf besteht.

Abbildung 111: Bisherige Abdeckung durch industrieeigene KWK-Anlagen oder Fernwärme und bisher nicht ausgeschöpfte Potenziale (- BKWK 2011)



Für die Potenzialschätzung werden folgende Faktoren berücksichtigt

- Temperaturniveau des Kältebedarfs
    1. Temperaturen im Tiefkühlbereich erfordern zumeist Kaskadenschaltungen, hierbei sind AKM-KKM-Kaskaden oft sinnvolle Lösung
    2. Hohe benötigte Kühltemperaturen führen zu geringen Temperaturspreizungen in der AKM, das Wärmeverhältnis verbessert sich aber nicht mehr wesentlich. Im Gegensatz dazu können KKM mit abnehmender Temperaturspreizung zunehmend effizienter arbeiten.
- Verlauf des Kältebedarfs – Kompensation durch sonstigen Wärmebedarf
- Strombezugsmenge
- Betriebsgrößen (AKM sind im Gegensatz zu KKM erst ab größerer Leistung erhältlich (siehe Abschnitt 6.3.1.3 Marktübersicht Ab- und Adsorptionskälteanlagen ab Seite 104 und Abbildung 60), das gleiche gilt für BHKWs)

Die folgende Tabelle 27 beinhaltet eine Bewertung der einzelnen Branchen im Bezug auf KWKK-Installationen und listet die möglichen Elektroenergieeinsparungen auf. Eine Bewertung erweist sich hier als schwierig, da einzelne Industriezweige eine Vielfalt von Prozessen aufweisen. Ein weiterer Unsicherheitsfaktor stellt die bisherige Abdeckung von KWK-Installationen in den einzelnen Branchen dar. Die Broschüre vom Branchenverband KWK (-BKWK 2011) liefert einen Überblick über genutzte und noch auszuschöpfende Potenziale der

KWK in der Industrie. Die Aufschlüsslung der Branchen in der vorliegenden Studie ist jedoch mit derjenigen in der Broschüre nicht identisch.

Tabelle 27: Bewertung des Kältebedarfs in Kombination mit möglichen KWKK-Installationen - Abschätzung des einzusparenden Strombedarfs durch Nutzung von wärmegetriebenen Kältesystemen

Branche			Kältebedarf			Abwärme		Bewertung und Schätzung				Resultat		
Hauptgruppe	Nebengruppe	Unterguppe	benötigte Kälte-temperatur [°C]	Kältebedarfs-chrakteristik (saisonal/ täglich)	Strombedarf zu Kältebedarf	Bewertung (Textform)	Bewertung (-- bis ++)	erfordert Speicherung	Schätzung deckbarer Anteil am Objekt	möglicher Realisierungsgrad	Produkt aus deckbarer Anteil x Realisierungsmöglichkeit	resultierender zusätzlich durch AKM gedeckter Kältebedarf [GWh/a]	Anteil am bisherigen KK-gedecktem Kältebedarf	Einsparpotenzial Endenergie Strom [GWh/a]
Industriekälte	Bergbau, Gewinnung von Steinen und Erden (nur Steinkohleabbau)		3	konstant / konstant	14	konstanter Kühlbedarf, hoher Eigenstrombedarf	++	nein	100%	80%	80%	448	80%	128
	Papier- und Zellstoffindustrie		6	schwankend / konstant	248	bereits heute hoher KWK-Eigenanteil, Integration in bestehende Systeme denkbar	+	nein	100%	60%	60%	151	60%	54
	Druckindustrie		20	schwankend / konstant	20	hohe benötigte Kühlwasservorlauftemperaturen, viel Abwärme vorhanden, Nutzung nur bei hohen Außentemp.	o	nein	50%	10%	5%	0	0%	0
	übrige chemische Industrie ohne Luft- und Gasverflüssigung		-4	konstant / konstant	19	bereits hohe Abwärmemengen vorhanden, bereits AKM-Anteil vorhanden, bereits hoher KWK-Eigenanteil	o/+	nein	60%	50%	30%	885	17%	328
	übrige chemische Industrie: nur Luft- und Gasverflüssigung		-190	-	1	Kältemittel selbst ist Kälteanwendung (Absorption nur in Zwischenkühlstufen denkbar -> entspricht einer Prozessoptimierung)	--	nein	0%	0%	0%	0	0%	0
	Pharmazeutische Industrie		6	konstant / konstant	0	relativ konstanter Kältebedarf, auch sonstige Abwärmenutzung denkbar	+	nein	80%	75%	60%	438	51%	110
	Kunststoff- und Gummiverarbeitung		6	konstant / zyklisch	10	saisonal konstante Kühllasten, hoher Elektroenergiebedarf	+	ja	80%	75%	60%	1.692	60%	846
	Bau- und Baustoffindustrie		-25	schwankend / konstant	14.567	in Betonwerken kann mit einer Kühlung des Betons eine Reduzierung des Zementanteils erreicht werden (-> Prozessopt.)	++	nein	100%	80%	80%	1	80%	0

Industriekälte	Elektro- und Elektronikindustrie (auch Leiterplattenfertigung und Löten, Halbleiterfertigung)		5	schwankend / konstant	0	bereits heute hohes Maß an KWKK vorhanden, Eigenstromerzeugung in der Halbleiterindustrie üblich zur Erhöhung der Versorgungssicherheit	+	nein	80%	90%	72%	49	15%	12
	Fahrzeugindustrie		6	schwankend / konstant	53	hoher Strombedarf, relativ konstanter Kältebedarf	+	ja	60%	90%	54%	732	49%	183
	Maschinenbau		6	schwankend / konstant	47	hoher Strombedarf, relativ konstanter Kältebedarf	+	ja	60%	90%	54%	540	54%	135
	Kompressoren, z.B. zur Drucklufterzeugung, Drucklufttrocknung (mit KältesystemenL)		3	konstant / konstant	149	hoher Strombedarf, relativ konstanter Kältebedarf, absolute Leistungen in dezentralen Anlagen oft zu klein für AKM	++	nein	40%	80%	32%	120	32%	30
	Prozesskälte (Flüssigkeitskühlsätze) für industrielle Anwendungen		6	schwankend / konstant	28	Leistungsbedarf oft zu klein für AKM-Einsatz, aber hoher Elektroenergiebedarf	o	denkbar	80%	24%	3%	365	21%	104
	Schaltschrankkühlung		20	konstant / zyklisch	0	benötigte Kühlwassertemperatur zu hoch für vorteilhaften AKM-Betrieb	-	nein	0%	0%	0%	0	0%	0
Nahrungsmittelherstellung	Nahrungsmittelindustrie	Betriebe ab 50 Beschäftigte NK	0	konstant / zyklisch	4	saisonal konstante Kühllasten, Betriebe können zu klein für sinnvollen AKM-Einsatz werden	+	partiell	50%	40%	6%	1.979	38%	618
	Nahrungsmittelindustrie	Betriebe ab 50 Beschäftigte TK	-25	konstant / zyklisch	3	saisonal konstante Kühllasten, AKM-KKM-Kaskaden sinnvoll	o	partiell	50%	25%	6%	799	23%	532
	Nahrungsmittelindustrie	Betriebe 20...49 Beschäftigte NK	0	konstant / zyklisch	3	saisonal konstante Kühllasten, Betriebe können zu klein für sinnvollen AKM-Einsatz werden	+	ja	50%	30%	6%	363	28%	140
	Nahrungsmittelindustrie	Betriebe 20...49 Beschäftigte TK	-25	konstant / zyklisch	2	saisonal konstante Kühllasten, AKM-KKM-Kaskaden sinnvoll	o	ja	50%	15%	6%	112	13%	94
	Nahrungsmittelindustrie	Nebenprozesse NK	0	konstant / zyklisch	1	saisonal konstante Kühllasten, Betriebe können zu klein für sinnvollen AKM-Einsatz werden	+	ja	50%	30%	6%	208	28%	83
	Nahrungsmittelindustrie	Nebenprozesse TK	-25	konstant / zyklisch	1	saisonal konstante Kühllasten, AKM-KKM-Kaskaden sinnvoll	o	ja	50%	15%	6%	64	13%	58
el-herstellung	Brauereien		-7	konstant / zyklisch	4	Es existiert ein weitreichender Wärmebedarf im Temperaturniveau um ca. 85 °C, dauerhaft Kühlbedarf (ideale Anwendung)	++	ja	100%	80%	80%	575	80%	220

	Milchviehbetriebe	4	konstant / zyklisch	0	BHKW bereits bei Abwärme diskutiert, nur kurzweiliger Kältebedarf, Speicherung notwendig, aber Stallkühlung im Winter, Beheizung mit Biogas	+	ja	90%	20%	18%	189	18%	105
Gebäudeklimatisierung	Gewerbe Handel Dienstleistungen	6	schwankend / schwankend	47	zu kurze Betriebszeiten, oft zu kleine Anlagen	-		30%	50%	15%	942	11%	325
	Industrie	6	schwankend / schwankend	33	zu kurze Betriebszeiten der Kältenutzung, möglich wenn Wärme anderweitig genutzt werden kann	-	nein	30%	10%	3%	415	2%	143
	Rechenzentren und Server	6	schwankend / schwankend	0	zu kurze Betriebszeiten, hohe Kühlwassertemperaturen	-		0%	0%	0%	0	0%	0
	Haushalte	6	schwankend / schwankend	555	zu kurze Betriebszeiten, zu klein	-		0%	0%	0%	0	0%	0
Summe											**11.196**		**4.260**

In Abbildung 112 ist der Kältebedarf in den einzelnen Branchen aufgeschlüsselt. Zusätzlich dargestellt ist der bereits heute mit Ab- und Adsorptionskälteanlagen gedeckte Kältebedarf sowie der Anteil, der durch die Nutzung vorhandener Abwärme gedeckt werden kann (pessimistisches Szenario). Abbildung 113 zeigt die hiermit verbundenen erreichbaren Elektroenergieeinsparungen bezogen auf die Branchen.

Abbildung 112: Kältebedarf und gegenwärtiger bzw. perspektivischer Anteil der mit Abwärme angetriebenen Kältetechnik – Potenzial: Einsatz von Erdgas-betriebenen KWK-Anlagen

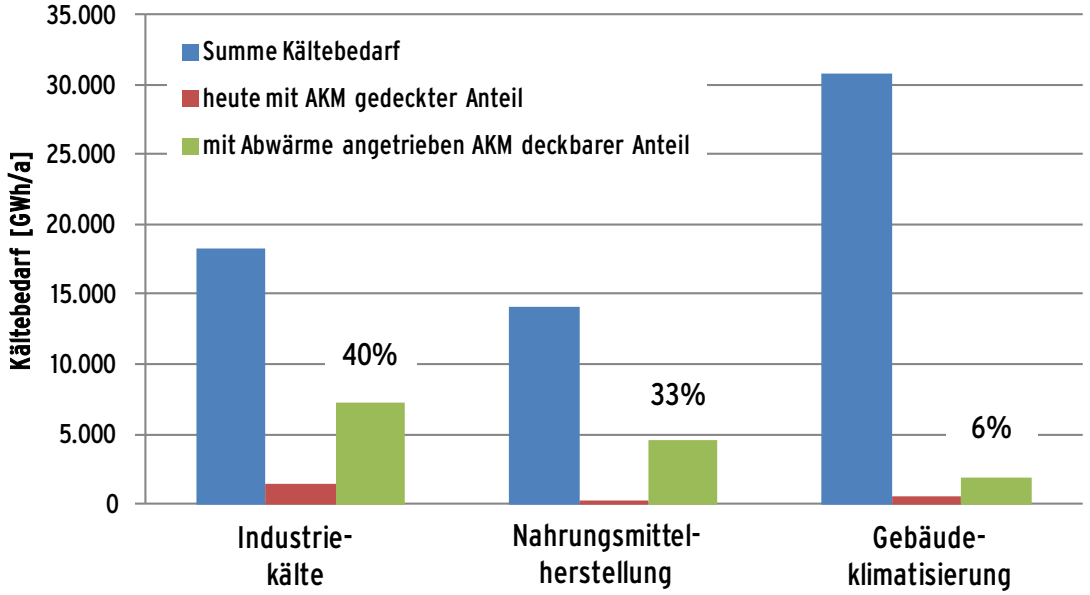
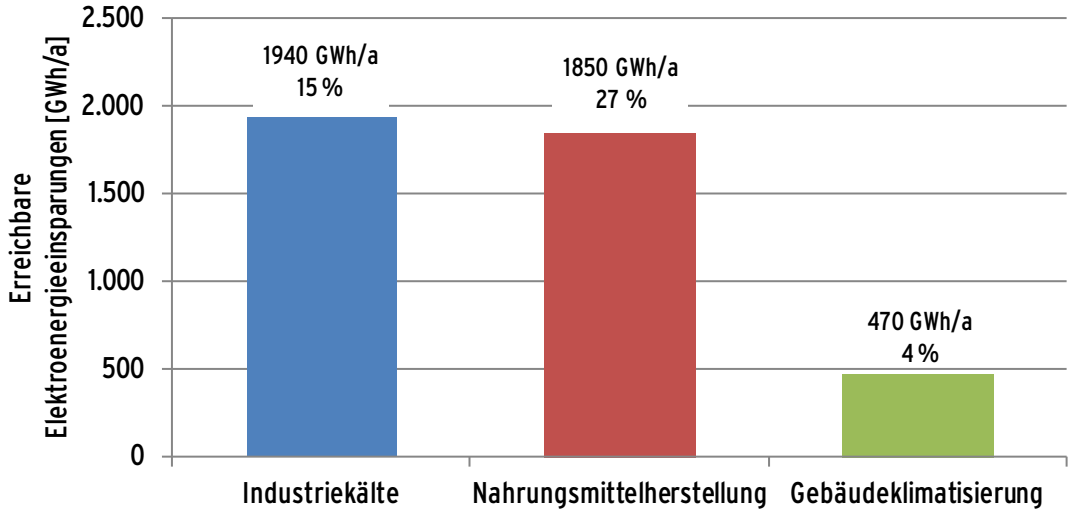


Abbildung 113: Erreichbare Stromeinsparungen in den einzelnen Branchen (Prozentanteile auf dem Strombedarf der Kälteerzeug je Branche gerechnet) - Potenzial: Einsatz von Erdgas-betriebenen KWK-Anlagen – Eigenbedarf Strom der AKM nicht berücksichtigt

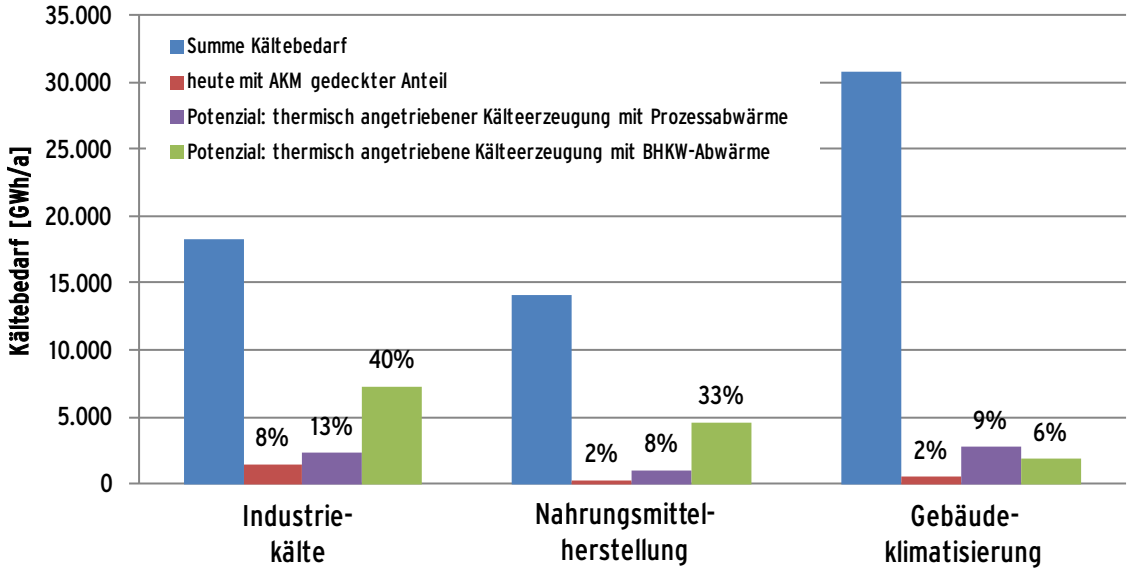


8.3 Diskussion der Potenziale

Bereits heute liegt der Anteil der Industriekälteerzeugung wärmegetriebener Anlagen bei etwa 9 %. Ein großer Anteil ist hierbei in der Chemieindustrie sowie in Produktionsstätten mit eigener Energieversorgung (z.B. der Halbleiter-Industrie) zu finden.

Abbildung 114 stellt den Kältebedarf sowie die Deckungsgrade durch thermisch angetriebene Kälteerzeugung dar. Die Grafik umfasst die Aufschlüsselung nach den Bereichen sowie dem Bestand und den diskutierten Potenzialen. Insbesondere im Industriebereich sowie im Nahrungsmittelherstellungsbereich gibt es größere Potenziale im zweistelligen Prozentbereich.

Abbildung 114: Darstellung der Potenziale zur wärmegetriebenen Kälteerzeugung



Ein Vergleich der TEWI-Einsparpotenziale soll auf den indirekten Anteil begrenzt werden. Dieser ist direkt an die Elektroenergieeinsparpotenziale sowie an die spezifische TEWI-Bewertung der Antriebswärme gebunden. Zur Darstellung des Potenzials wird sich auf ungenutzte Prozessabwärme bzw. Abwärme aus BHKWs unter Berücksichtigung des Verdrängungsmix bezogen. Die Wärme wird daher mit 0 kg CO_2/kWh bewertet. Zur Berechnung der Stromeinsparung werden neben den möglichen Deckungsanteilen (aufgeschlüsselt nach Unterbranchen) die spezifischen Stromeinsparpotenziale aus den Untersuchungen in Kapitel 7 herangezogen.

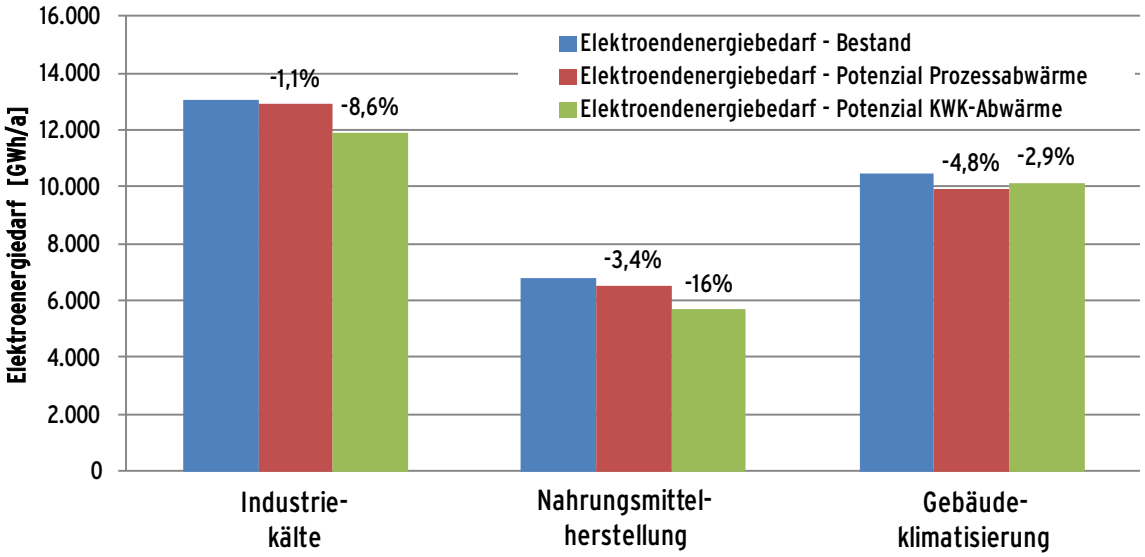
Hierbei wird für die Industriekälte ein spezifisches Einsparpotenzial von 58 % - einstufige NH_3-H_2O-AKM mit Verdunstungskühlung und indirekter Kälteübergabe gegenüber einem direktverdampfenden Kältesystem mit dem Kältemittel R134a – angenommen. Für die Gebäudeklimatisierung wird ein spezifisches Einsparpotenzial von 65 % - einstufige H_2O-LiBr-Absorptionskältemaschine gegenüber einem Kaltwassersystem mit dem Kältemittel R134a – angenommen. In der Praxis sind höhere Einsparpotenziale aufgrund von mehrstufigen Absorptionssystemen sowie energetisch weniger effizienten Vergleichssystemen möglich. Die spezifischen Einsparpotenziale berücksichtigen den Eigenstrombedarf der wärmegetriebenen Kältesysteme inklusive notwendiger Pumpen und Rückkühlung.

Abbildung 115 stellt die berechneten Stromeinsparpotenziale grafisch dar. Unter Einbeziehung der spezifischen Emissionen der Stromerzeugung gehen die in Abbildung 116 dargestellten indirekten TEWI-Einsparpotenziale hervor.

Die Ergebnisse zur Elektroenergieeinsparung bleiben teilweise deutlich hinter den Potenzialen bezogen auf den Kältebedarf zurück. Dieses betrifft insbesondere den Industriekältebereich. Hier ist die Abweichung mit dem Einfluss der Gasverflüssigung im Bereich der chemischen

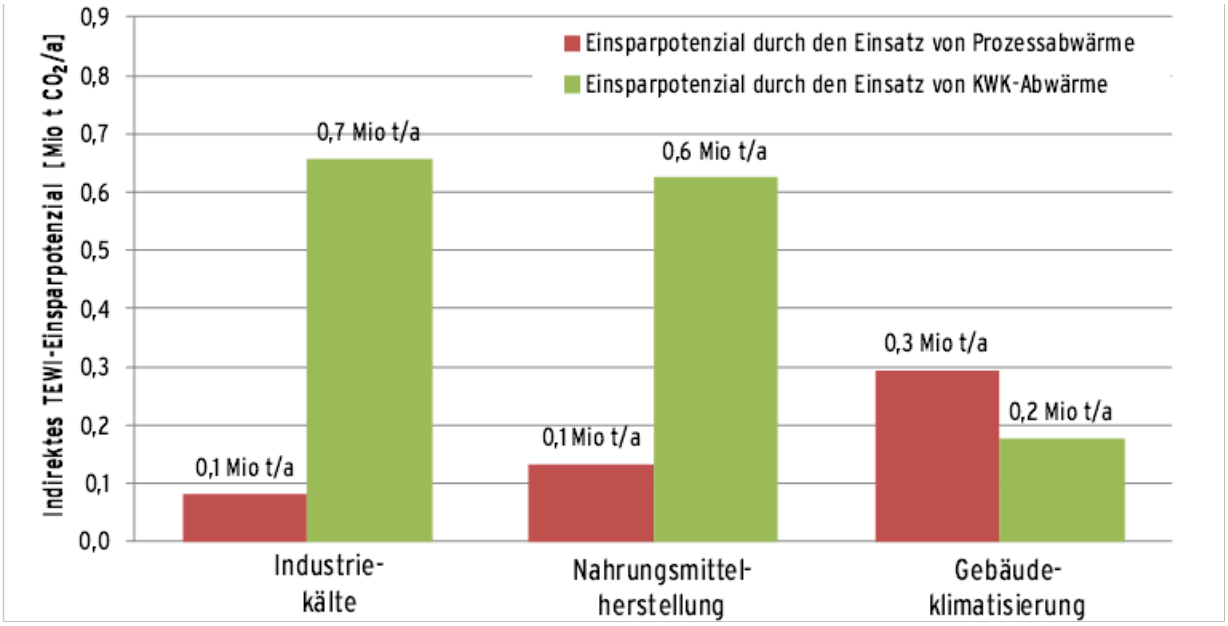
Industrie zu erklären. Durch die benötigten tiefen Prozesstemperaturen steht dem vergleichsweise geringen Kältebedarf von etwa 1.100 GWh/a ein vergleichsweiser hoher Elektroendenergiebedarf von etwa 7.500 GWh/a entgegen (siehe auch Abschnitt 5.4.5 ab Seite 71). Eine prozessinterne Integration von Absorptionskältemaschinen ist hier nicht sinnvoll möglich. Mit dem Einsatz von mehrstufigen Absorptionskältemaschinen sowie Neuentwicklungen auf dem Gebiet der Sorptionskälte (z.B. direkt-luftgekühlte Absorptionskältemaschinen) erschließen sich zusätzliche Potenziale zur Elektroendenergiesubstitution, welche hier nicht ermittelt wurden.

Abbildung 115: Elektroenergiebedarf der Kältetechnik der einzelnen Branchen unter Berücksichtigung der wärmegetriebenen Kälteerzeugungspotenziale (Elektroenergiebedarf der AKM für Pumpen, Ventilatoren, etc. ist berücksichtigt)



Die hieraus hervorgehenden TEWI-Minderungspotenziale – es wird nur der indirekte Anteil betrachtet – sind in Abbildung 116 dargestellt. Im Vergleich zu den indirekten Treibhausgasemissionen der gesamten stationären Kältetechnik entspricht die Summe des Minderungspotenzials von 1,6 Mio. t CO_2/a etwa 4 %, bezogen auf die betrachteten Anwendungen etwa 9 %.

Abbildung 116: Indirektes TEWI-Einsparpotenzial der einzelnen Branchen unter Berücksichtigung der wärmegetriebenen Kälteerzeugungspotenziale (Elektroenergiebedarf der AKM für Pumpen, Ventilatoren, etc. ist berücksichtigt)



9 Verbesserung des Marktpotenzials klimafreundlicher Kühltechniken

Wie aus den vorangegangenen Kapiteln deutlich wurde, sind für eine klimafreundliche Kühlung und Klimatisierung zahlreiche Aspekte zu berücksichtigen. Hierzu zählen die Wahl eines Kältemittels mit niedrigem GWP-Wert und geringer Toxizität einerseits in Verbindung mit Auslegung und Installation einer hocheffizienten Anlage mit hoher Dichtheit sowie geeigneter Kälteübergabesysteme mit hohen Vorlauftemperaturen (wie z.B. Kühldecken, Betonkernaktivierung). Auch sind bei vorhandenen Wärmequellen Ab- und Adsorptionskältemaschinen sowie Prozesse mit offener Ab- oder Adsorption zur Lufttrocknung hinsichtlich ihrer Anwendungsmöglichkeiten zu prüfen.

Je nach Anwendungsfall und der damit verbundenen Anlagencharakteristik kommt den genannten Faktoren unterschiedliche Bedeutung zu. Bei der Wahl von Multi-Split-Klimageräten bzw. der Montage von VRF-Systemen zur Gebäudeklimatisierung kommt der Anlagendichtheit aufgrund der großen Anzahl an Rohrleitungsverbindungen und Anschlüssen und der damit einhergehenden Leckageneigung eine hohe Bedeutung zu. Durch die geringe Vollbenutzungsstundenzahl machen die direkten TEWI-Emissionen, verursacht durch das Entweichen von Kältemittel, einen großen Anteil an den Gesamtemissionen aus. In vielen Bereichen der Industriekälteerzeugung werden sehr hohe Vollbenutzungsstunden erreicht. Die Senkung des Energiebedarfs hat in diesem Fall Priorität.

Die Vielfältigkeit der Anwendungen und die große Anzahl unterschiedlicher Techniken führen zu sehr verschiedenen Hemmnissen im Hinblick auf das Marktpotenzial klimafreundlicher Kühltechniken. Dies erfordert eine differenzierte Betrachtung hinsichtlich der Werkzeuge zur Überwindung dieser Hemmnisse. In der Diskussion zu Verbesserungsmöglichkeiten des Marktpotenzials werden die folgenden Bereiche separat betrachtet:

- Allgemeine Faktoren und Anlagenkonzepte
- Kälte- und Klimaanlagen mit natürlichen Kältemitteln
- Ab- und Adsorptionskältemaschinen

9.1 Allgemeine Faktoren und Anlagenkonzepte

In vielen Marktbereichen mit Relevanz bzgl. des Energieverbrauchs, sind Produkte zur Steigerung der Energieeffizienz bereits kommerziell verfügbar. Hierzu zählen z.B. der Bereich der Beleuchtungstechnik (Energiesparlampen, LED), Wärmedämmung von Gebäuden, EC-Motoren, etc. In einigen Bereichen der klimafreundlichen Kühltechniken sind Technologien vorhanden, für die jedoch bisher keine oder nur wenige ausgereifte Produkte marktverfügbar sind. Hierdurch entstehen sich bedingende Abhängigkeiten, die schwer zu durchbrechen sind. Abbildung 117 stellt diese Abhängigkeiten graphisch dar.

- So lange keine Produkte verfügbar sind, liegt bei potenziellen Anwendern eine Skepsis bezüglich Funktionalität, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit vor
- Die Skepsis führt zu einer geringen Nachfrage entsprechender noch in der Entwicklung befindlicher oder kurz vor der Markteinführung stehender Produkte
- Aufgrund hoher Produktentwicklungs- und Markteinführungskosten sowie vergleichsweise geringer Stückzahlen pro Serienprodukt (sehr stark

anwenderspezifischer Aufbau) in Verbindung mit der geringen Nachfrage werden von Herstellern wenige Produkte entwickelt und zur Marktreife gebracht.

Abbildung 117: Sich bedingende Abhängigkeiten für den Einsatz neuer Technologien

9.1.1 Verkaufssektor

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurden sehr unterschiedliche Systeme zur Kälteversorgung untersucht. Die Darstellungen in Kapitel 6.1, ab Seite 84, zeigen eine Vielzahl weiterer Systeme bzw. Systemvarianten. Ausgehend von der Diskussion des Vergleichs der Systeme zeigten sich zudem Vorteile bei der Kombination unterschiedlicher Systeme, wie z.B. Trennung von Entfeuchtung und Kühlung oder parallele Installation von KKM und AKM. Das heißt, für die Kältebereitstellung erweisen sich Standardsysteme zwar oft als günstige Lösungen im Bezug auf die Investitionskosten, jedoch nicht zwingend auch im Bezug auf Funktion und Klimafreundlichkeit.

Eine Vielzahl von TGA-Büros und Installationsfirmen beschränken sich auf einen Hauptlieferanten. Begründet wird dies mit

- den Kenntnissen der Firma hinsichtlich der Anlagentechnik und
- den günstigeren Einkaufsbedingungen mit steigender Abnahmemenge.

Damit binden sich Unternehmen auch an die Produktpalette des Lieferanten, die oft über die Standardlösungen mit HFKW-Kältemitteln nicht hinausreicht. Alternative Lösungen werden in diesem Falle vom Auftragnehmer nicht bevorzugt.

Die Überwindung dieses Hindernisses erfordert bei den Anlagenbetreibern bzw. Bauherren bereits ein hohes Bewusstsein über mögliche Kälteerzeugungs- bzw. Klimatisierungsalternativen. Über diese Kenntnisse müssen ebenso Planern und Anlagenbauern verfügen, um Lösungen über den gängigen Standard hinaus anbieten und umsetzen zu können.

Handlungsempfehlung

Die Information von Anlagenbetreibern und Bauherren stellt eine wichtige Quelle des Antriebs für Planer und Installationsfirmen dar. Wenn klare Vorgaben bei der Vergabe der Leistung vorliegen, sind diese entsprechend umzusetzen und können nicht durch Standardlösungen ersetzt werden. Das bedeutet, dass in erster Linie Betreiber

und Bauherren über die verfügbaren Technologien und deren Vorteile zu informieren sind. Der Entwurf von Informationsbroschüren ist auf diese Zielgruppe auszurichten, kälte- und klimatechnische Alternativen sind in Fachzeitschriften für den Gebäudebau und spezielle Industriezweige stärker zu integrieren. In der Ausbildung von Bauingenieuren, Architekten und Energieberatern sind die verschiedenen Technologien mindestens hinsichtlich der Verfügbarkeit sowie deren Vor- und Nachteile zu vermitteln.

9.1.2 Fehlende Sensibilität

Eine nicht funktionierende Heizung oder ein schlecht laufender Motor werden von Anwendern schnell als solche wahrgenommen. Ebenso wird durch Verbrauchsanzeigen der Einfluss des eigenen Handelns auf den Energiebedarf und die Effizienz ersichtlich und schafft eine Sensibilität für den jeweiligen Prozess.

Eine solche Sensibilität ist hingegen im Bereich der Kältetechnik nur gering ausgeprägt. Technische Probleme bzw. Installationsmängel, die sich zum Beispiel in Leckagen manifestieren können, werden erst bei spürbaren Auswirkungen, wie z.B. starkem Anstieg der Raumtemperaturen oder Verderben von Kühlgut in Kühlräumen, wahrgenommen. Eine separate Aufzeichnung des Nutz- sowie Endenergiebedarfs der Kältetechnik erfolgt nur in seltenen Fällen.

Die für diese Beobachtungen notwendigen Messtechniken sind in weiten Bereichen vorhanden (z.B. Elektroenergieverbrauchsmesstechnik, Füllstands-, Druck- und Temperaturmesstechnik). Kältemengenzähler sind für indirekte Systeme, wie z.B. Kaltwassersätze, analog zu den Wärmemengenzählern verfügbar. Für direktverdampfende Kältesysteme ist die Bestimmung der Kältemittelmassenströme und der spezifischen Enthalpien erforderlich. Standardgeräte sind nicht markverfügbar. Einzelne Systeme befinden sich in der Entwicklung (Tzscheutschler 2011).

Problematisch sind jedoch auch hierbei Systeme ohne Trockenverdampfung (z.B. Kältemittelumlaufsysteme), bei denen die Bestimmung der Enthalpien am Ein- und Austritt im Zweiphasengebiet erfolgen muss. Derzeit sind keine Sensoren zur direkten Messung dieser Größen verfügbar.

Bei klassischen Trockenverdampfungssystemen lässt sich auch eine Abschätzung des Massenstroms über Hoch- und Niederdruck in Zusammenspiel mit dem Verdichterkennfeld realisieren. Die notwendigen Druckwerte werden für größere Anlagen üblicherweise zur Reglung verwendet und liegen somit bereits als Messwert vor.

Leckagedetektierung ist indirekt ebenfalls über Prozessgrößen möglich. Hierdurch werden Leckagen deutlich einfacher und vor gravierenden Auswirkungen wie z.B. mangelnde Kälteleistung und Ausfall der Anlage (Abschaltung durch Druckwächter) erkannt.

Handlungsempfehlung

Ziel sollte die Förderung der Sensibilität von Kälteanlagenbetreibern sein. Infrage kommen hierbei finanzielle Förderungen für den Einbau von Kältemengen- und separaten Energiezählern in Verbindung mit einer automatischen Auswertung sowie für den Einbau indirekter Leckagedetektiersysteme. In diesem Zusammenhang wäre eine Förderung der Erneuerung von Anlagen mit einer nachgewiesenen Effizienzsteigerung ein Anreiz zur aktiven Nutzung installierter Messtechnik. Ein Anreiz für Leckagedetektiersysteme kann anstelle einer finanziellen Förderung auch durch andere Maßnahmen, beispielsweise durch eine wirksame GWP-gerechte Besteuerung der Kältemittel erfolgen (siehe Absatz 9.2.5 – Wirtschaftliche Hindernisse). Hierbei bleibt auch für Anlagenbetreiber die Auswahl zwischen der aufwendigeren Installation einer nahezu hermetisch ausgeführten Anlage und einer Anlage mit vielen lösbaren

Verbindungen, jedoch mit einem effektiven Leckagedetektiersystem.

Die Entwicklung allgemein anwendbarer Überwachungstools mit automatischer Übermittlung möglicher Störmeldungen per SMS oder E-Mail ist zu fördern.

9.1.3 Gesetzliche Vorgaben

EU-Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäude (EPBD) - Energieeinsparverordnung (EnEV)

Durch die EU-Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EPBD) werden Forderungen für energetische Mindeststandards von Gebäude festgeschrieben. Diese Forderungen werden durch die Energieeinsparverordnung für Gebäude (EnEV) in nationales Recht umgesetzt.

Die aktuelle Energieeinsparverordnung für Gebäude (EnEV 2009) liefert bau- und anlagentechnische Forderungen für Gebäude, die unter Einsatz von Energie beheizt und/oder gekühlt werden sowie für Anlagentechnik und Einrichtungen, die der Heizungs-, Kühl-, Raumluft- und Beleuchtungstechnik sowie der Warmwasserversorgung von Gebäuden dienen. Die EnEV umfasst ein Verfahren, einer um das Gebäude gezogenen Bilanzgrenze sowie der hierüber übergebenen Endenergie und deren primärenergetische Bewertung.

Ausgangspunkt für die Gebäudebewertung ist die Berechnung des Primärenergiebedarfs eines Referenzgebäudes mit entsprechender Referenztechnologie. Dieser berechnete Primärenergiebedarf gilt als Obergrenze für das reale Gebäude inklusive Anlagentechnik. Der Primärenergiebedarf des realen Gebäudes wird unter Anwendung der Berechnungsvorschriften nach (DIN-V-18599-1 2012) oder anhand von erfassten Energieverbrauchsdaten - bei Gebäudebestand - ermittelt.

Zusätzliche Anforderungen, die sich aus der EnEV für die Kälte- und Klimaanlagen ergeben, umfassen (EnEV 2009):

- Anforderung für Ventilatoren / lufttechnische Anlagen bei Auslegungsleistungen > 4000 m^3/h
- Forderung von selbsttätigen Regelungseinrichtungen für Anlagen mit gezielter Feuchteänderung der Raumluft, mit getrennten Sollwerten für Be- und Entfeuchten sowie mindestens mit gemessener Zu- oder Abluftfeuchte als Führungsgröße
- Last- oder zeitabhängig regelbarer Luftstrom bei Zentralgeräten oder Luftkanalsystemen für Zuluftströme > 9 $m^3/(h \cdot m^2)$. Auszunehmen sind Luftströme, die der Einhaltung von Arbeits- oder Gesundheitsschutzregelungenerforderlich sind
- Berechnungsvorschrift für die Wärmelast von Kälteverteilungs- und Kaltwasserleitungen sowie Armaturen
- Forderung nach Wärmerückgewinnungssystemen bei lufttechnischen Anlagen > 4000 m^3/h mindestens nach Klassifizierung H3 nach DIN EN 13053

Die beschlossene novellierte Gebäuderichtlinie EPBD 2010 fordert für Neubauten ab 2020 (bzw. bereits 2019 für öffentliche Gebäude) die Umsetzung als Niedrigstenergiegebäude (Artikel 9). Weiterhin soll der äußerst geringe Energiebedarf vorwiegend aus erneuerbaren Energiequellen gedeckt werden, welche am oder nahe dem Gebäudestandort erzeugt werden. Zur Umsetzung

sollen erste Forderungen in die bevorstehende Novelle EnEV 2013, mit Gültigkeit ab 1.1.2016 einfließen (Tuschinski 2013). Wesentliche Veränderungen sind hierbei:

- Der Jahresprimärenergiebedarf des Referenzgebäudes ist mit dem Faktor 0,75 zu multiplizieren
- Der Wärmeschutz der Gebäudehülle wird erhöht
- Der Nicht-erneuerbarer Anteil des elektrischen Stroms ist primärenergetisch mit 1,8 zu bewerten
- Bei KWK-beheizten Gebäuden ist nach DIN-V-185999 Verfahren B zu rechnen, abweichend der Norm ist für den eingespeisten elektr. Strom aus den KWK-Anlagen der Wert 2,3 zu verwenden

Ecodesign-Richtline für Kälte- und Klimasysteme

Die Ecodesign-Richtlinie dient der umweltgerechten Gestaltung energiebetriebener Produkte in der Europäischen Union. Sie wird in Europa durch die EuP-Richtlinie 2005/32/EG (Energy-using Products – Umweltgerechte Gestaltung energiebetriebener Produkte) sowie die ErP-Richtlinie 2009/125/EG (Energy-related Products – Weiterfassung um energieverbrauchsrelevanter Produkte wie z.B. Fenster, Isolationsmaterialen, etc.) umgesetzt (Siede 2011). Die Umsetzung in deutsches Recht erfolgt über das Energiebetriebene-Produkte-Gesetz, EBPG vom 27.02.2008.

Die EuP- und ErP-Richtlinie betrachtet den gesamten Energiebedarf im Lebenszyklus eines Produktes von der Herstellung, über den Verbrauch während des Betriebs sowie dessen Entsorgung. Die Richtlinie bedarf zur Anwendung zusätzlicher produktspezifischer Verordnungen, welche umgehend nach Veröffentlichung gültig sind. Für die vorliegenden Anwendungsbereiche sind folgende Verordnungen relevant:

- ENTR Lot 1: Kühl- und Gefriergeräte inkl. Kühlaggregate für industrielle Prozesse, Zentralkühlsysteme, Kühlräume, Kühlzellen, Schockkühler und –froster, Verflüssigungssätze
- ENTR Lot 6: Klima- und Lüftungsanlagen
- ENER Lot 10: Raumklimageräte bis zu 12 Kilowatt Leistung und Komfortventilatoren
- ENER Lot 11: Pumpen, Ventilatoren, Elektromotoren
- ENER Lot 12: Gewerbliche Kühl- und Tiefkühlgeräte
- ENER Lot 13: Kühl- und Tiefkühlgeräte im Haushalt

Die Verordnungen für Raumklimageräte und Komfortventilatoren (Verordnung (EG) Nr. 206/2012) sowie für Umlaufpumpen (Verordnung (EG) Nr. 641/2009), Elektromotoren (Verordnung (EG) Nr. 640/2009) und Ventilatoren (Verordnung (EG) Nr. 327/2011) sind bereits in Kraft getreten. Alle weiteren befinden sich noch in der Entwurfsphase. Für ENTR Lot 1 liegen in einem Arbeitsdokument des Europäischen Rats für energieeffiziente Wirtschaft erste Vorschläge für eine Regulierung vor (ECEEE 2011). Diese betreffen Kältesätze, welche als Komplettsatz verkauft werden:

- Vorgaben zu minimalen Leistungszahlen und Jahresarbeitszahlen von luftgekühlten Verflüssigungseinheiten, die Berechnung der Jahresarbeitszahlen erfolgt nach EN14511
- Ab 2014 muss der Energiebedarf um 2-5%, ab 2017 um 12-16% gesenkt werden

Für Kühlräume werden Vorgaben zu maximalen Wärmedurchgangswerten gemacht. Weiterhin ergeben sich Vorschriften für die Produktdokumentation.

Für die im Arbeitsdokument geforderten Leistungs- und Jahresarbeitszahlen sind Bezugstemperaturen für die Wärmeabgabe, jedoch nicht für die Wärmeaufnahme genannt. Eine Bewertung der Zahlen ist daher schwierig. Die direkten TEWI-Emissionen werden in den Vorstudien mit nur 3-6 % bewertet und daher in den Anforderungen nicht weiter betrachtet.

9.1.4 Investitionsvermarktung – Energieeinspar-Contracting

Individuallösungen bzw. komplexe Anlagenkombinationen ebenso wie KKM mit natürlichen Kältemitteln bzw. Ab- und Adsorptionskältemaschinen (es sei auf die spezifische Diskussion unter den genannten Punkten: Abschnitt 9.2.5 ab Seite 198 sowie Abschnitt 9.3.3 ab Seite 206 verwiesen) erfordern im Allgemeinen höhere Investitionskosten. Ein hoher Anteil der Kosten ist einem notwendigen Materialmehraufwand (komplexe Anlagensysteme) bzw. den Zusatzaufwand für Planung und Montage gegenüber Serienprodukten geschuldet.

Durch die Finanz- und Wirtschaftskrise sind die Risiken gängiger Kapitalmarktanlagen gestiegen sowie die Rendite und die Renditeerwartungen gesunken. Betrachtet man beispielsweise den Rendite-Verlauf deutscher Staatsanleihen, so sind diese seit 1995 stetig von etwa 8 auf etwa 2 % im Jahre 2013 gesunken (TradingEconomics, 2013). Für institutionelle Investoren bedeutet das eine neue Herausforderung, denn Geld ist am Kapitalmarkt aufgrund der äußerst niedrigen Leitzinssätze der Notenbanken zu sehr günstigen Konditionen verfügbar (Fankhauser 2012).

Gegenüber der Kursentwicklung von Aktien oder Staatsanleihen ist für den Energiepreis durch den Anstieg der Weltbevölkerung, den zunehmenden Industrialisierungsgrad sowie den weltweit steigenden Lebensstandard längerfristig eine steigende Tendenz zu erwarten (Leipziger Institut für Energie GmbH 2012; Kafsack 2011; EC 2011). Investitionen in Energieeffizienzmaßnahmen stellen für den Kapitalmarkt eine interessante Alternative zu bisherigen Angeboten dar. Hierzu sind am Markt bereits einige Dienstleister mit unterschiedlichen Konzepten zu finden, z.B. als reine Investoren (Fankhauser 2012) oder als kompletter Dienstleister, welche als Energiezwischenlieferant auftreten (Tejero 2012).

Entstehen durch klimafreundliche Kühltechniken Einsparungen bei den Betriebskosten, sind solche Modelle auch hier denkbar. Schwer einzuschätzen sind hierbei Erstinstallationen im Klimabereich, da keine praxisgerechten Vergleichswerte für neue Gebäude und deren Nutzung vorliegen. Für die Nachrüstung von BHKWs in Kombination mit AKMs oder den Ersatz eines herkömmlichen Kaltwassersatzes durch einen hocheffizienten Kaltwassersatz mit natürlichem Kältemittel sind solche Ansätze gut denkbar.

Handlungsempfehlung

Wichtig ist in diesem Zusammenhang die notwendige Aufklärung von Finanzdienstleistern zum Thema Kälte- und Klimatechnik, z.B. durch Einbindung bei Informationsveranstaltungen. Ein gutes Beispiel stellt hierbei die Plattform Energy Efficiency in Industrial Processes (EEIP, www.ee-ip.org) dar. Sie verbindet gezielt Entwickler und Hersteller von Effizienztechnologien mit den Anwendern sowie zugehörigen Dienstleistern (z.B. des Finanzsektors).

Denkbar wären ein bewusstes Einladen solcher Dienstleister zu Messen (z.B. ISH, Chillventa) und Konferenzen (z.B. DKV-Tagung). Die Einbindung in dort stattfindende Vortragsveranstaltungen wäre besonders zu begrüßen. Investoren und Dienstleister, welche in diesem Bereich tätig sind, sollten auch in Fachzeitschriften der Kälte- und Klimatechnik

zum publizieren motiviert werden.

9.1.5 Pilotprojekte – Öffentliche Beschaffung

Lösungen wie Betonkernaktivierung oder sorptive Entfeuchtung weisen einen vergleichsweise hohen Investitionsbedarf und eine frühe notwendige Einbeziehung in die Bauplanung auf. Die kurzfristigeren Planungszeiten als auch die geforderten kurzen Amortisationszeiten in der Industrie sind mitverantwortlich für das frühzeitige Ausschließen solcher Lösungen. Mit einer gezielten Forderung von klimafreundlichen Klimasystemen für Neubauten im öffentlichen Bereich kann die Verbreitung und Anwendung alternativer Klimalösungen verstärkt werden. In Verbindung mit der Durchführung eines Programms zum Monitoring der Anlagen können die erzielten Erfahrungen aus öffentlichen Projekten an interessierte Anwender weitergegeben werden. Ein vergleichbarer offener Umgang mit den Erfahrungen ist in der Industrie nicht zu erwarten.

Handlungsempfehlung

Die Einführung einer verpflichtenden Prüfung der Integration klimafreundlicher Kältesysteme für Neubauten im öffentlichen Bereich ist empfehlenswert. Um eine Analyse und Dokumentation der Betriebserfahrungen durchführen zu können, sollte in der Planungs- und Umsetzungsphase die Einbeziehung ausreichender Messtechnik berücksichtigt werden.

9.2 Kälte- und Klimaanlagen mit natürlichen Kältemitteln

Im Bereich der Haushaltskältetechnik ist der Einsatz natürlicher Kältemittel seit über 20 Jahren Standard. So findet sich in nahezu allen, im europäischen Raum angebotenen Kühl- und Gefrierschränken das Kältemittel R600a (Isobutan). Auch im Bereich steckerfertiger Gewerbekühlgeräte (Tiefkühltruhen, Getränkekühler) stellt die Verwendung von R290 (Propan) oder R600a heute den Standard dar.

In der zu Beginn durchgeführten Marktrecherche zu Komponenten für natürliche Kältemittel wurde deutlich, dass bereits viele Einzelkomponenten von mehreren Herstellern angeboten werden. Der Produktumfang bleibt jedoch noch hinter dem für HFKW-Kältemittel zurück (siehe Kapitel 6.2.3 Kompressionskälteanlagen – Kaltwassersätze, ab Seite 95)

Im Folgenden sollen Hemmnisse sowie Anreize in folgende Bereiche gegliedert werden:

- Sicherheitstechnische Hemmnisse und Einschränkungen durch gesetzliche Reglungen
- Anreize zur Anwendung natürlicher Kältemittel – Einschränkungen zur Anwendung von HFKW-Kältemitteln
- Anwendungstechnische Hemmnisse
- Technische Hemmnisse
- Wirtschaftliche Hindernisse
- Öffentliche Beschaffung

Hierbei fließen viele Faktoren in mehrere der genannten Kategorien ein.

9.2.1 Sicherheitstechnische Hemmnisse und Einschränkungen durch gesetzliche Reglungen

In Europa hergestellte oder in Verkehr gebrachte Produkte müssen konform zu den entsprechenden Richtlinien der Europäischen Gemeinschaft sein. Für den Fall von Kälte- und Klimaanlagen sind dies die Maschinenrichtline, die Niederspannungsrichtlinie, die EMV-Richtlinie und ggf. die Druckgeräterichtlinie. Die Umsetzung in nationales Recht erfolgte über das Produktsicherheitsgesetz (BMJ 2011).

Aufgrund dieser gesetzlichen Vorgaben und der Produkthaftung berufen sich Hersteller im Allgemeinen auf harmonisierte europäische Normen. Für Klima- und Kälteanlagen steht hierbei die DIN EN 378 (DIN-EN-378-1 2011) im Vordergrund.

Die DIN EN 378 regelt die Einteilung der Kältemittel, der Anlagensysteme und Aufstellungsbedingungen. Ausgehend von diesen Faktoren werden die maximal zulässigen Kältemittelfüllmengen festgelegt. Für die Aufstellungsvarianten werden unter Einbeziehung von direkten und indirekten Systemen 18 Varianten unterschieden. Diese 18 Varianten werden für alle Kältemittelkategorien (A1, A2, A3, B1, B2) weiter unterteilt.

Tabelle 28: Einteilung von Kältemitteln, Anlagensystemen und Aufstellungsorten in der DIN EN 378

Kategorie	Gruppen
Kältemittel	nach Toxizität A und B nach Brennbarkeit 1-3 (siehe Tabelle 6, Seite 64)
Anlagensystem	**direkt** (Verdampfer befindet sich in direktem Kontakt mit der/dem zu kühlenden Luft/Kühlgut) **indirekt** (Verdampfer kühlt einen Wärmeträger, der durch einen geschlossenen Kreislauf mit der/dem zu kühlenden Luft/Kühlgut in direktem Kontakt steht)
Aufstellungsort	**Klasse A** – Allgemeiner Aufstellungsbereich (Ort, an dem jede Person auch ohne Sicherheitsvorkehrungen Zutritt hat oder an denen Personen schlafen dürfen) – z.B. Hotels, Verkaufsräume, öffentl. Einrichtungen **Klasse B** – Überwachter Aufstellungsbereich (Räume, Gebäudeteile oder Gebäude in denen die Anzahl der sich aufhaltenden Personen begrenzt ist und von den mindestens einige mit den allg. Sicherheitsvorkehrungen betraut sind) – z.B. Bürogebäude **Klasse C** – Aufstellungsbereich, zu denen nur befugte Personen Zutritt haben (die befugten Personen müssen mit den Sicherheitsvorkehrungen vertraut sein)

Grundlegend gibt es für Kälteanlagen mit dauerhaft geschlossenem Kältekreislauf mit den Kältemitteln der Klassen A2 und A3 (Kohlenwasserstoffe wie z.B. R290) und einer maximalen Füllmenge von 150 g keine Einschränkung hinsichtlich der Aufstellung. Mit dieser zulässigen Füllmenge sind selbst kompakte Klimageräte (z.B. Fassaden-integrierte Klimageräte) nur begrenzt realisierbar.

Direkte Systeme im Personenaufenthaltsbereich – Mono- und Multi-Split-Geräte

In allen Aufstellungsbereichen gilt für direkte Komfortklimageräte, wie z.B. Mono- und Multi-Split-Geräte mit außenaufgestellten Außeneinheiten (Verdichter, Verflüssiger und Sammler) mit Kältemitteln der Kategorie A2 und A3 und Füllmengen über 4 m^3 x LFL (untere Explosionsgrenze in kg/m^3) eine maximale Füllmenge $m_{\mathrm{KM,max}}$ basierend auf der untere Explosionsgrenze LFL, sowie der Raumgrundfläche A und der Einbauhöhe des Geräts h_0:

$$m_{max} = 2{,}5 * (LFL)^{\frac{5}{4}} * h_0 \ (A)^{\frac{1}{2}}$$

Ausgehend von einer gegebenen Füllmenge kann die minimale Raumfläche A_{min} berechnet werden:

$$A_{min} = (m/(2{,}5 * \ LFL^{\frac{5}{4}} * \ h_0))^2$$

Tabelle 29 gibt eine Übersicht zu sicherheitsrelevanten Daten brennbarer natürlicher Kältemittel. Tabelle 30 liefert Werte zur vorgeschriebenen Einbauhöhe h_0 für unterschiedliche Aufstellungsarten an.

Tabelle 29: Daten bezüglich Brennbarkeit/Explosivität für ausgewählte Kältemittel der Sicherheitsklasse A3, Quelle: DIN EN 378, Sicherheitsdatenblätter der Kältemittel

Kältemittel	R170	R1150	R290	R1270	R600	R600a	R32	R152a
Handelsname	Ethan	Ethen, Ethylen	Propan	Propen, Propylen	n-Butan	Isobutan	CH_2F_2	CH_3-CHF_2
LFL (untere Expl.-grenze nach DIN EN 378)	0,038 kg/m^3	0,036 kg/m^3	0,038 kg/m^3	0,047 kg/m^3	0,048 kg/m^3	0,038 kg/m^3	0,307 kg/m^3	0,130 kg/m^3
untere Ex.-grenze	2,4 Vol%	2,4 Vol%	1,7 Vol%	1,8 Vol%	1,4 Vol%	1,5 Vol%	14 Vol%	ca. 4 Vol%
obere Ex.-grenze	16 Vol%	34 Vol%	9,5 Vol%	11 Vol%	8,5 Vol%	8,5 Vol%	31 Vol%	ca.17 Vol%

Zündtemperatur	515 °C	425 °C	470 °C	455 °C	365 °C	460 °C	648 °C	455 °C
Mindestzünd-Energie	0,25 mJ	0,082 mJ	0,25 mJ	>0,18 mJ	0,25 mJ	>0,18 mJ	k. A.	k. A.

Für die Einbauhöhe gibt die Norm folgende Werte an:

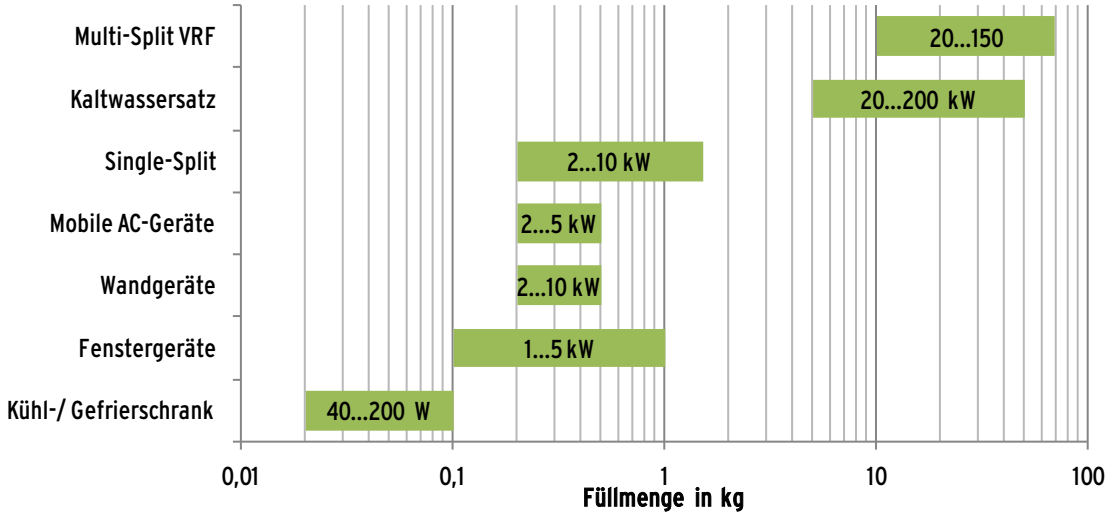
Tabelle 30: Einbauhöhen nach Aufstellungsart, Quelle: DIN EN 378

Aufstellungsart	Einbauhöhe h_0
Aufstellung auf dem Boden	0,6 m
Wandmontage	1,8 m
Fenstermontage	1,0 m
Deckenmontage	2,2 m

Typische Mono-Split-Geräte weisen Füllmengen zwischen 200 g und 1 kg Kältemittel auf (vgl. Abbildung 118). Für ein Mono-Split-Gerät mit dem Kältemittel R290 und einer Füllmenge von 400 g resultiert eine minimale Raumfläche von 28 m^2. Multi-Split-Systeme bzw. VRF-Anlagen weisen im gesamten Kreislauf sehr viel höhere Kältemittelmengen (teilweise über 40 kg) auf. In diesem Fall wird die notwendige Raumfläche im Allgemeinen weit unterschritten. Der Einsatz von brennbaren Kältemitteln in Multi-Split-Systemen ist daher ausgeschlossen.

Für Kältemittel der Gruppe A1 (R744 (Kohlendioxid)) wird die Gesamtfüllmenge direkter Systeme in öffentlichen Gebäuden (Hotels, Krankenhäuser, etc.) auf den *praktischen Grenzwert* x *Rauminhalt* begrenzt. Für R744 ergibt sich für ein Raumvolumen von 50 m^3 (20 m^2 Grundfläche, 2,5 m Raumhöhe) eine maximale Füllmenge von 5 kg. Für das in Multi-Split-Geräten heute weitverbreitete Kältemittel R410A ergibt sich analog eine maximale Füllmenge von 22 kg. Für Bürogebäude (Aufstellungsbereich B2) liegen keine Einschränkungen vor.

Abbildung 118: Typischen Füllmengen und Leistungsbereich von Kälteanlagen zur Klimatisierung, Quelle: (Daniel Colbourne 2012) ergänzt um Daten zu Kühl und Gefrierschränken



Für Kältemittel der Gruppe B2 (R717 (Ammoniak)) ist die Gesamtfüllmenge direkter System in öffentlichen Gebäuden auf den *praktischen Grenzwert* x *Rauminhalt* begrenzt. Ausgehend vom praktischen Grenzwert von R717 gilt in einem Raum von 50 m^3 Rauminhalt eine maximale Füllmenge von 17,5 g! In Bürogebäuden (Aufstellungsbereich Klasse B) gilt eine maximale Füllmenge von 25 kg. Die Installation von Multi-Split-Systemen mit R717 in Bürogebäuden wäre

somit in gewissen Grenzen noch zulässig. Positiv zu bewerten ist die gute Wahrnehmbarkeit von Ammoniak bereits bei sehr kleinen, relativ ungefährlichen Konzentrationen.

Tabelle 31: Praktische Grenzwerte natürlicher Kältemittel nach DIN EN 378

Kältemittel	R1150	RE170	R290	R1270	R600a	R717	R718	R723	R744
Handelsname	Ethen, Ethylen	Dimethyl-ether DME	Propan	Propen, Propylen	Isobutan	Ammoniak	Wasser	Ammoniak + DME	CO_2
Praktischer Grenz-wert DIN EN 378	0,007 kg/m³	0,013 kg/m³	0,008 kg/m³	0,008 kg/m³	0,011 kg/m³	0,00035 kg/m³	-	k.A. zum Gemisch	0,1 kg/m³

Indirekte Systeme mit Außenaufstellung bzw. im Maschinenraum

Die Aufstellung aller kältemittelführenden Systeme im Freien oder in einem Maschinenraum stellt den günstigsten Fall hinsichtlich zulässiger Füllmenge dar. Nach Abschnitt 3.2.1 ist auch ein dicht umschließendes Gehäuse mit mechanischer Belüftung als Maschinenraum zu verstehen. Zu beachten ist jedoch, dass entweichendes Kältemittel nicht in benachbarte Räume, Treppenhäuser oder Höfe gelangen darf, sondern gefahrlos abgeführt werden muss.

Vorbehaltlich des Umstandes, dass nur befugte Personen zu diesen Maschinenräumen bzw. zum Aufstellungsort im Freien Zutritt haben, liegen keine Einschränkungen hinsichtlich der Füllmenge durch die DIN EN 378 vor.

Zusammenfassung der sicherheitstechnischen Hemmnisse

Ausgehend von der DIN EN 378 als relevante Sicherheitsnorm fasst Tabelle 32 die Möglichkeiten zum Einsatz von natürlichen Kältemitteln für unterschiedliche Anwendungsbereiche zusammen. Bei Außenaufstellung indirekter Systeme, wie sie für eine Vielzahl von Kaltwassersätzen im Klimabereich praktiziert wird, ergeben sich nach DIN EN 378 keine Einschränkungen. Im Bereich direkter Systeme ist die Unterscheidung zwischen den Aufstellungsbereichen Klasse A und B hervorzuheben. In Aufstellungsbereichen der Klasse B, zu den Büroräume explizit in der DIN EN 378 als Beispiel genannt werden, ist die Aufstellung von Multi-Split-Geräten mit den Kältemitteln R744 (CO_2) problemlos, mit Ammoniak bzw. dem Gemisch Ammoniak und Dimethylether mit Einschränkungen möglich. Singlesplit-Geräte mit brennbaren Kältemitteln sind eingeschränkt und ab 150 g Kältemittelfüllmengen nur in Einklang mit der Raumgröße möglich. Zu diesem Punkt sei im Folgenden auf die (ab Seite 182) vorgestellten Forschungsergebnisse eines Projektes der Tianjin Fire Research Institute (TFRI) in China verwiesen.

Im Industriekältebereich ergeben sich für direkte Systeme für alle natürlichen Kältemittel bis auf R718 (Wasser) Einschränkungen. Diese sind für R744 (CO_2) am geringsten und für brennbare Kältemittel der Klasse A3 am höchsten. Durch Kombination von Systemen können diese Einschränkungen minimiert werden. Für die Tieftemperaturkälte bietet sich so beispielsweise eine Kaskadenschaltung mit R290 in der Hochtemperaturstufe und R744 in der Tieftemperaturstufe mit Direktverdampfung an.

Tabelle 32: Möglichkeiten der Anwendung von natürlichen Kältemitteln für unterschiedliche Fälle ausgehend von der Norm DIN EN 378

<table>
<tr><th></th><th colspan="2">Direkte Systeme zur Klimatisierung</th><th>Indirekte Systeme zur Kältebereitstellung / Klimatisierung</th><th rowspan="2">Direkte Systeme zur Industriekälte-bereitstellung</th></tr>
<tr><th>Kältemittelgruppen</th><th>Mono-Split</th><th>Multi-Split</th><th>KWS Außenaufstellung</th></tr>
<tr><td>brennbare Kältemittel A3 (R290, R1270 etc.)</td><td>mit Einschränkung möglich</td><td>nicht möglich</td><td>uneingeschränkt möglich</td><td>sehr eingeschränkt möglich</td></tr>
<tr><td rowspan="2">brennbare, toxische Kältemittel B2 (R717, R723)</td><td>in Bürogebäuden (Klasse B) möglich</td><td>in Bürogebäuden (Klasse B) sehr eingeschränkt möglich</td><td rowspan="2">uneingeschränkt möglich</td><td rowspan="2">mit Einschränkungen möglich</td></tr>
<tr><td>in öffentlichen Gebäuden (Klasse A) nicht möglich</td><td>in öffentlichen Gebäuden (Klasse A) nicht möglich</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Kohlendioxid A1 (R744)</td><td>in Bürogebäuden (Klasse B) möglich</td><td>in Bürogebäuden (Klasse B) möglich</td><td rowspan="2">uneingeschränkt möglich</td><td rowspan="2">mit geringen Einschränkungen möglich</td></tr>
<tr><td>in öffentlichen Gebäuden mit geringen Einschränkungen möglich</td><td>in öffentlichen Gebäuden mit Einschränkungen möglich</td></tr>
<tr><td>Wasser A1 (R718)</td><td>uneingeschränkt möglich</td><td>uneingeschränkt möglich</td><td>uneingeschränkt möglich (Aufstellung auch in allg. Aufenthaltsbereichen möglich (Klasse A)</td><td>uneingeschränkt möglich</td></tr>
</table>

Untersuchung zum Gefahrenpotenzial von Mono-Split-Klimageräten mit R290

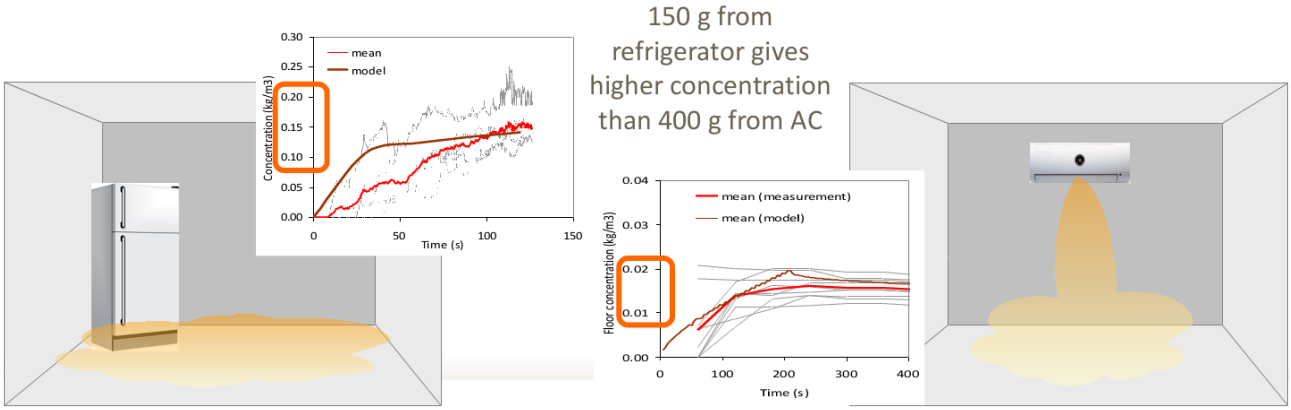
Die Gefahr die von Mono-Split-Systemen mit Propan als Kältemittel ausgeht, wurde durch ein umfangreiches Forschungsprojekt des Tianjin Fire Research Institute (TFRI) in China untersucht. Die Untersuchungen umfassen Analysen (CFD und experimentell) zur Propan-Verteilung beim Auftreten von Leckagen, das Erreichen der Zündgrenzen an verschiedenen Orten und nach verschiedenen Zeiten nach Auftreten der Leckage sowie auch das Zusammenspiel von vielen Außengeräten in Hochhäusern.

Im Ergebnis zeigt sich, dass trotz der höheren Kältemittelfüllmenge im Mono-Split-Gerät nur eine vergleichbare Konzentration gegenüber Haushaltskältegeräten im Raum erreicht wird (siehe Abbildung 119Die Kohlenwasserstoffe Isobutan und Propan besitzen eine höhere Dichte im Vergleich zu Luft und sammeln sich daher am Boden. Bei Kühlschränken erfolgt die Ausströmung in Bodennähe. Beim Innengerät strömt bei einem raumseitigen Leck das Kältemittel sehr weit oben aus. Durch den Ventilator erfolgt zudem eine gute Vermischung in der Raumluft.

Explosive Ereignisse wurden für die Kühl-Gefrier-Kombination mit einer Häufigkeit von $6x10^{-8}$/a detektiert, als akzeptabel für den Einsatz in der Öffentlichkeit gelten $<10^{-5}$/a (Daniel Colbourne 2012). Demgegenüber lag die Häufigkeit explosiver Ereignisse für das untersuchte Mono-Split-

Gerät bei $5x10^{-10}$, d.h. um zwei Größenordnungen kleiner gegenüber der Häufigkeit bei Kühl-Gefrier-Kombinationen.

Abbildung 119: Kältemittelverteilung im Raum bei Auftreten eines Lecks, Vergleich zwischen Kühl-Gefrier-Kombination und Single-Split-AC-Gerät, Quelle: Daniel Colbourne 2012 – Ergebnisse der Studie des TFRI



Im Ergebnis zeigte die Studie ein gegenüber Haushaltskältegeräten mit brennbaren Kältemittel geringeres Risiko für Mono-Split-Klimageräte mit dem Kältemittel Propan.

Zusammenfassung

Die bestehende Normung lässt den Einsatz von natürlichen Kältemitteln in weiten Bereich zu. Im Bereich der Klimakälte ist durch den Einsatz indirekter Systeme nahezu in allen Fällen eine Kältebereitstellung durch Anlagen mit natürlichen Kältemitteln möglich.

Handlungsempfehlung

Die Ergebnisse der Studie des TFRI (Daniel Colbourne 2012) sind durch weitere Untersuchungen zu verifizieren. Eine Anpassungen der DIN EN 378 aus hieraus hervorgehenden Erkenntnissen ist anzustreben.

9.2.2 Anreize zur Anwendung natürlicher Kältemittel – Einschränkungen zur Anwendung von HFKW-Kältemitteln

Gesetzliche Reglungen können durch Besteuerung, Einschränkungen und Verbote von derzeit verwendeten HFKW-Kältemitteln einen Anreiz für die Verwendung natürlicher Kältemittel erwirken. In einigen Ländern Europas, wie auch über dessen Grenzen hinaus, wurden bereits Erfahrungen hierzu gesammelt.

Emissionsgerechte Besteuerung der Treibhausgase

Zur Durchsetzung der im Rahmen des Kyoto-Protokolls vereinbarten Ziele zur Reduktion der Treibhausgasemissionen setzen die einzelnen Staaten auf verschiedene Instrumente. Ein Instrument stellt der Handel mit Emissionszertifikaten dar. Die Idee liegt in einer Emissionsreduktion mit möglichst niedrigen volkswirtschaftlichen Kosten, d.h. die Emissionen sollen zu erst dort eingespart werden, wo dies am wenigsten Kosten verursacht. Treibhausgase werden hierbei entsprechend ihres GWP-Werts berücksichtigt.

Eine Besteuerung von Kältemitteln entsprechend ihrer GWP-Werte greift die Idee der Emissionsminderung nach volkswirtschaftlichen Gesichtspunkten auf. Hierdurch werden

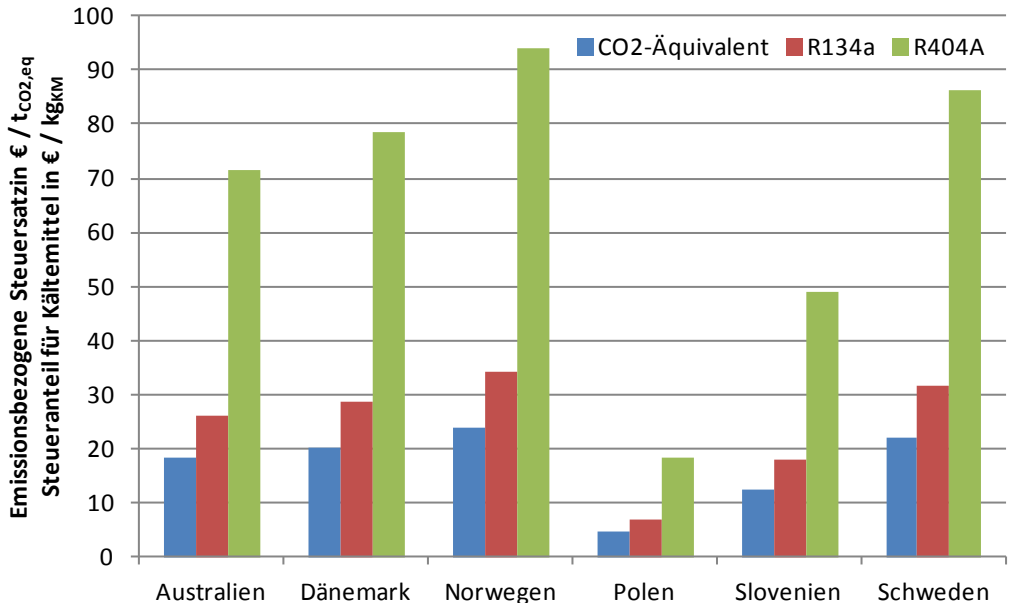
Anreize zur Minimierung der Füllmenge, Maßnahmen zur Steigerung der Anlagendichtheit und deren Überwachung und zur Wahl eines Kältemittels mit geringerem GWP gesetzt.

In Tabelle 33 sind Steuern auf HFKWs inklusive Ausgestaltungshinweisen einzelner Staaten aufgelistet. Zum Vergleich seien die Bezugspreise für die Kältemittel R134a und R404A in Deutschland zwischen 10-16 €/kg genannt. Durch die Besteuerung erfolgt eine Preissteigerung zwischen 40 und 220% für R134a bzw. zwischen 120 und 620% für R404A. Ein Pfand auf HFKW, welches einen Anreiz für eine sachgerechte Entsorgung darstellt, wird bisher nur in Norwegen erhoben.

Tabelle 33: Besteuerung von Kältemitteln in einzelnen Staaten, Quellen: (Honeywell 2012; Rhiemeier, Harnisch & Kauffeld 2008; Strogies & Gniffke 2013)

Staat	Kosten pro CO2-Äquivalent	Kostenbeispiel für R134a	Ausgestaltung / Bemerkungen
Australien	ca. 18,25 € / tCO_2 eq (23 AU$ / tCO_2 eq)	ca. 26,10 € / kg_{R134a}	jährliche Steigerungsrate von 5% ist fixiert
Dänemark	ca. 20,00 € / tCO_2 eq (150 DKK / tCO_2 eq)	ca. 28,60 € / kg_{R134a}	Erhebung bei Import, Ausnahmen stellen vorgefüllte Systeme dar (z.B. Kühlschränke)
Norwegen	ca. 24,00 € / tCO_2 eq (190,50 NK / tCO_2 eq)	ca. 34,30 € / kg_{R134a}	Erhebung bei Import (bisher keine Produktion im Land selbst), Steuer ist als Pfand ausgeführt –> Anreiz für sachgerechte Entsorgung
Polen	ca. 4,70 € / tCO_2 eq	ca. 6,70 € / kg_{R134a}	finale Entscheidung im Parlament steht noch aus
Slowenien	ca. 12,50 € / tCO_2 eq	ca. 17,90 € / kg_{R134a}	erste Füllung wird anteilig mit 5% berücksichtigt, Servicefüllungen und ähnliche werden mit 100% angerechnet
Schweden	ca. 22 € / tCO_2 eq	ca. 31,50 € / kg_{R134a}	finale Entscheidung im Parlament steht noch aus

Abbildung 120: Steuersätze bezogen auf CO2-Äquivalent bzw. auf die Kältemittel R134a und R404A



Einschränkung und Verbote zur Anwendung von Kältemitteln mit hohem GWP-Wert

In einigen Ländern Europas existieren über die Verordnung (EG) Nr 842/2006 über bestimmt e fluorierte Treibhausgase (F-Gase-Verordnung) hinausgehende nationale Verordnungen zur

Beschränkung des Einsatzes von FKWs und HFKWs. Viele dieser Verordnungen traten bereits vor der F-Gase-Verordnung in Kraft. Die EU-Entscheidung zur vorläufigen Beschränkung der lokal strikteren Reglungen bis 2012 wurde aufgehoben, so dass diese bestehen bleiben können (Hydrocarbons21.com 2012). Einen Überblick über die einzelnen Reglungen gibt Tabelle 34.

Tabelle 34: Überblick über HFKW-Verbote in Europa

Land	Verbote
Dänemark	Seit 1.1.2007 HFKW-Verbot für Anlagen mit mehr als 10 kg Füllmenge - darf auch nach 2012 lt. EU-Entscheidung weiter bestehen (hydrocarbons21-2012)
Österreich	partielles HFKW-Verbot seit 2002 mit zahlreichen Ausnahmen (z.B.: zulässig sind bis 20 kg in ortsfesten Anlagen, bis 100 kg bei Anlagen mit verzweigtem Rohrsystem)
Schweden	Füllmengenbegrenzung von maximal 30 bis 40 kg HFKW
Schweiz	Bewilligungspflicht für HFKW in Neuanlagen, Erweiterungen und Umbauten. Voraussetzung der Bewilligung sind fehlende Alternativen mit natürlichen Kältemitteln. Für Anlagen mit mehr als 3 kg: Meldepflicht, Wartungsheft und Dichtigkeitsprüfung

Quellen: ChemRRV-Schweiz 2006; Hydrocarbons21.com 2012; Rhiemeier, Harnisch, Ters, et al. 2008; WKO 2007

Die Wirksamkeit der Maßnahmen zur Beschränkung der HFKW-Kältemitteln wird im Bereich der der Tiefkühlanwendung ersichtlich. In diesem Anwendungsbereich sind R744-Kälteanlagen in skandinavischen Ländern als auch der Schweiz heute Standard (Brouwers 2009). Als Haupteinflussfaktoren sind die o.g. Maßnahmen hinsichtlich GWP-gerechter Kältemittelbesteuerung sowie weiterführende gesetzliche Einschränkungen hinsichtlich HFKW-Anwendungen und Füllmengen zu werten.

Die Wirksamkeit unterschiedlicher Szenarien der Reduzierung der Anwendung von HFKW-Kältemitteln wird in einer Studie der SKM Enviros im Auftrag der EPEE (Gluckman et al. 2012) untersucht. Hierbei werden vier verschiedene Szenarien zur stufenweisen Verringerung der F-Gase-Nutzung in Europa aufgeschlüsselt nach Wirksamkeit in den unterschiedlichen Anwendungsgebieten der Kältetechnik analysiert (siehe Tabelle 35). Die Ergebnisse der Studie sind für die Beurteilung der erreichbaren Emissionsminderungen hervorgehend aus der derzeitigen Überarbeitung der europäischen F-Gase-Verordnung von Bedeutung.

Tabelle 35: Untersuchte Szenarien zum HFKW-Phase-Down innerhalb der EPEE-Studie (Gluckman et al. 2012)

Szenario	Beschreibung	Kommentare
A	Geringe Auswirkung (Basis-fall; alle Szenarien werden in der wirtschaftlichen Analyse mit dem Basisfall verglichen)	Das Szenario A stellt eine konservative Sichtweise der derzeitigen Veränderungen im Kältemitteleinsatz dar. Es wird als Normalfall („Business As Usual") für den Vergleich mit allen folgenden Szenarien zugrunde gelegt. Das Szenario A gibt den möglichen Einsatz von HFKWs basierend auf der derzeitigen Gesetzgebung (insbesondere der F-Gase Verordnung von 2006) wieder.
B	Mittlere Auswirkung	Szenario B führt Reduzierungen des HFKW Einsatzes in neuen Systemen ein und Verbesserungen der Leckageniveaus durch komplette Implementierung der F-Gase Verordnung.
C	Hohe Auswirkung	Im Vergleich zu Szenario B geht dieses Szenario von (i) höherem Einsatz von Alternativen mit sehr niedrigem GWP Wert aus, (ii) frühem Einsatz von Alternativen mit mittlerem GWP Wert für neue Anlagen, um die Installierung von neuen Systemen mit hohem GWP Wert zu vermeiden und (iii) Retrofill eines Teils des Bestands, der mit Kältemitteln mit hohem GWP befüllt ist (besonders HFKW 404A), wenn es die Umstände erlauben.

D	Höchste Auswirkung	Dieses Szenario geht einen Schritt weiter als Szenario C und setzt den umfassenden Einsatz von A2L (leicht brennbaren) Kältemitteln ab 2020 in stationären Klimaanlagen und Industriekälte voraus.

Tabelle 36 fasst die erreichbaren Bruttoemissionsreduktionen verglichen mit dem Standardszenario A für Europa im Jahr 2030 zusammen. Die größten Anteile entfallen hier auf die Gewerbekälte. Für die in dieser Studie relevanten Bereiche werden differenzierte Aussagen deutlich. Im Bereich der Industriekälte birgt das Szenario C eine hohe zusätzliche Einsparung gegenüber Szenario B, Szenario D führt nur noch zu geringen weiteren Einsparungen. Für stationäre Klimaanlagen wird bereits mit Szenario B die größte Reduktion erreicht, der zusätzliche Gewinn der Szenarien C und D ist vergleichsweise gering. Für Kaltwassersätze werden mit Szenario D keine weiteren Einsparungen gegenüber Szenario C erreicht.

Tabelle 36: Reduzierung der Bruttoemissionen (Mio. t_{CO2}) verglichen mit Szenario A, Europa 2030 (Gluckman et al. 2012)

Bereiche \ Szenarien	B	C	D
Haushaltskälte	0,1	0,1	0,1
Gewerbekälte	24,2	34,6	34,6
Transportkälte	0,9	1,4	1,4
Industriekälte	**2,7**	**5,2**	**5,4**
stationäre Klimaanlagen und Wärmepumpen	**14,5**	**15,4**	**16,9**
Kaltwassersätze und Wärmepumpen (Wasser)	**5,0**	**5,8**	**5,8**
Mobile Klimageräte	2,3	2,5	2,5
Summe	49,6	64,8	66,6
Summe der für die Studie relevanten Bereiche	**22,2**	**26,4**	**28,1**

Tabelle 37 stellt die spezifischen Kosten der Emissionsreduzierungen, verglichen mit Szenario A, dar. Hierbei zeigt sich für die Bereich Industriekälte das wirtschaftlichste Ergebnis für Szenario C, welches verglichen mit Szenario A zu negativen Kosten führt. Auch für Kaltwassersätze sind die Kosten der Emissionsreduzierung vergleichsweise gering, für Szenario B ebenfalls negativ. Der Bereich der stationären Klimaanlagen weist vergleichsweise hohe Kosten auf, wobei die Szenarien B und C vergleichbar sind, Szenario D weist demgegenüber sehr hohe Kosten auf.

Tabelle 37: Kosten der Emissionsreduzierungen (€ / t_{CO2}) verglichen mit Szenario A, 2030 (Gluckman et al. 2012)

Bereiche \ Szenarien	B	C	D
Haushaltskälte	-119	-95	-95
Gewerbekälte	15	23	23
Transportkälte	5	-11	-11
Industriekälte	**10**	**-1**	**16**
Stationäre Klimaanlagen und Wärmepumpen	**24**	**27**	**45**
Kaltwassersätze und Wärmepumpen (Wasser)	**-7**	**4**	**4**
Mobile Klimageräte	7	11	11
Gesamt	15	19	25
Gesamt der für die Studie relevanten Bereiche	**15**	**16**	**31**

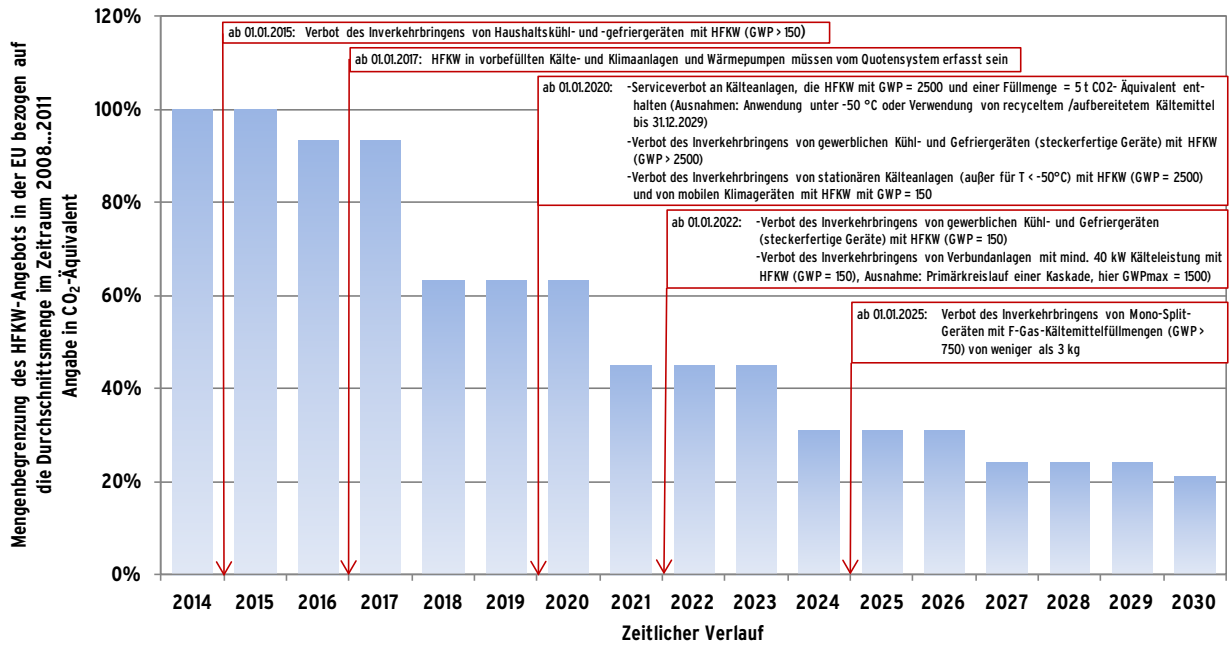
Vorschlag einer europäischen F-Gase-Verordnung

Die Europäische Kommission hat zum Ende des Jahres 2012 einen Vorschlag zur Novellierung der F-Gase-Verordnung erarbeitet (E. K. EC 2012). Die Europäische Kommission plant die Emissionen des Industriesektors bis zum Jahr 2030 um 70% zu verringern. Ein Beitrag hierzu soll durch die vorgeschlagene Verordnung erreicht werden. Enthalten sind hierbei zahlreiche Forderungen, welche für die Kälte- und Klimatechnik teils erhebliche Einschnitte bedeuten. Diese betreffen:

- „Serviceverbot“ für Kälteanlagen mit Kältemittelfüllmengen, die mindestens 5 t CO_2-Äquivalenten entsprechen mit einem Kältemittel, dessen GWP ≥ 2500 (z.B.: R404A, R507, R23) ist ab 2020
- Einführung einer im Zeitverlauf degressiven Mengenbegrenzung für das Inverkehrbringen von HFKW als Massengut in der Europäischen Union. Ab 2016 soll die in den Verkehr gebrachte Menge bis 2030 auf ein Niveau von 21% der von 2008 bis 2011 durchschnittlich verkauften Mengen gesenkt werden
- Verbot von Kältemitteln mit einem GWP ≥ 2500 in hermetisch geschlossenen gewerblichen Kühl- und Gefriergeräten ab 2017. Ab 2020 sind nur noch Kältemittel mit einem GWP < 150 zugelassen.
- Verbot von Kältemitteln mit einem GWP > 150 CO_2-Äquivalent in Haushaltskältegeräten ab 2015 sowie in mobilen Klimageräten ab 2020
- Vorbefüllungsverbot von Kälte- und Klimaanlagen sowie Wärmepumpen ab 2017

Den zeitlichen Verlauf der geplanten Einschränkungen stellt Abbildung 121 graphisch dar.

Abbildung 121: Zeitlicher Verlauf der geplanten Einschränkungen durch den Vorschlag zur EU-F-Gase-Verordnung



Die Beschränkung der HFKWs in Haushaltskältegeräten betrifft in der EU nur eine geringe Anzahl von Produkten. Die europäischen Haushaltskältegerätehersteller begannen mit der

Umstellung der Kältemittel auf reine Kohlenwasserstoffe, überwiegend R600a, schon vor ca. 20 Jahren.

In gewerblichen Kühl- und Gefriergeräten sind heute überwiegend die Kältemittel R134a (Kleingeräte, Kühltheken), R404A (Gefriertruhen, Getränkekühler), R744 (Getränkekühler) und R290 (Gefriertruhen, Kühltheken) zu finden. Aus den genannten Beispielen wird die begonnene Umstellung von fluorierten auf natürliche Kältemittel durch die Gerätehersteller deutlich. In den nächsten Jahren ist daher mit einer nahezu vollständigen Verdrängung von HFKWs in diesem Bereich zu rechnen.

Das Serviceverbot für Kältemittel mit einem GWP > 2500 betrifft überwiegend Anlagen mit dem Kältemittel R404A (GWP = 3922) und R507A (GWP = 3985). Beide Kältemittel galten als Ersatzstoffe für die FCKW-Kältemittel R22 und R502 (Bitzer-Kühlmaschinenbau 2012). Diese Kältemittel finden sich überwiegend in Kaltwassersätzen und in industriellen Anlagen. Eine Füllmenge von 5 t CO_2-Äquivalent entspricht hierbei etwa 1,25 kg R404A bzw. R507A. Da diese Füllmenge in nahezu allen Kaltwassersätzen und industriellen Kälteanlagen übertroffen wird, käme die vorgeschlagene Regelung einem Verbot dieser Kältemittel gleich.

Die gewählte Grenze des GWP von 2500 lässt zahlreiche Kältemittel unberührt. Hierzu zählen die Kältemittel R134a (GWP = 1430), R407C (GWP = 1774) und R410A (GWP = 2088). Insbesondere in Multi-Split-Geräten, in den R410A das Standardkältemittel darstellt und Füllmengen im Bereich zwischen 20 und 100 kg gängig sind, bleibt ein hohes Gesamtpotenzial unberührt. Das auf die Füllmengen bezogene CO_2-Äquivalent beträgt hier zwischen 40 und 200 t.

Der Hauptanreiz zur Umstellung auf natürliche Kältemittel ist durch die Beschränkung der in den Verkehr gebrachten HFKW-Mengen zu erwarten, welche sich in einem starken Preisanstieg der HFKW-Kältemittel auswirken sollte.

Handlungsempfehlung

Der Vorschlag zur europäischen F-Gase-Verordnung ist zu unterstützen. Im Falle einer Ablehnung auf europäischer Ebene ist eine analoge Umsetzung auf nationaler Ebene zu prüfen. Als Beispiele können die heute schon vorhandenen gesetzlichen Einschränkungen zur Anwendung von HFKWs in der Schweiz, Dänemark oder Norwegen, bzw. die GWP-bezogene Besteuerung angesehen werden.

9.2.3 Anwendungstechnische Hindernisse

Expertenbefragung – Hersteller von Endgeräten

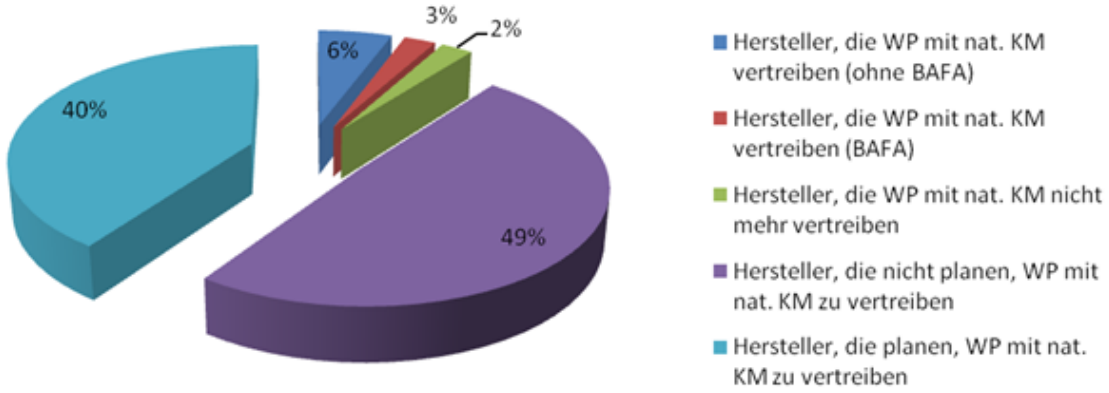
Ausgehend von einem weiteren Forschungsvorhaben am ILK Dresden (Müller et al. 2013) sowie einer Studie der Organisation Shecco (Shecco 2012) werden dort gesammelte Informationen aus Expertenbefragungen hier wiedergegeben. Ergänzt werden diese Informationen um Aussagen und Meinungen von Kälteanlagenbauern und Kältefachbetrieben, welche auf einer Informationsveranstaltung eines großen Kältefachhandels zum Vorschlag der neuen EU-F-Gase-Verordnung in persönlichen Gesprächen gesammelt wurden.

Im Rahmen des am ILK Dresden durchegführten Forschungsvorhabens „Wärmepumpen (WP) mit natürlichen Kältemitteln“ (Müller et al. 2013) wurden Hersteller von Hauswärmepumpen hinsichtlich ihrer Motivation und zu Hindernissen einer Verwendung natürlicher Kältemittel in

dieser Anwendung befragt. Die Hersteller konnten dabei in vier Kategorien eingeteilt werden. Die Verteilung der Hersteller am Markt stellt sich wie folgt dar (Abbildung 122):

- Hersteller, die nicht planen, WP mit natürlichen Kältemitteln herzustellen
- Hersteller, die vielleicht in der Zukunft WP mit natürlichen Kältemitteln herstellen
- Hersteller, die WP mit natürlichen Kältemitteln anbieten
- Hersteller, die WP mit natürlichen Kältemitteln aus dem Programm genommen haben

Abbildung 122: WP-Hersteller und deren Vertrieb von WP mit natürlichen Kältemitteln, (Müller et al. 2013)



Herstellergruppe	Aussagen
Hersteller, die nicht planen, WP mit natürlichen Kältemitteln herzustellen	Als Hauptgründe keine WP mit natürlichen KM anzubieten werden genannt: • Keine Einsicht zur Notwendigkeit (niedrige TEWI-Werte auch mit hermetisch dichten HFKW-Anlagen mit hoher Energieeffizienz erreichbar) • Nachteile natürlicher Kältemittel (brennbar, giftig, hohe Drucklage) • Zurückhaltung von Kunden und Installationsbetrieben • hoher Entwicklungsaufwand • kleine Firmen mit eingeschränktem Portfolio und wenig Kapazität für F&E • Gefahr von Marktanteilreduzierung durch (teurere) WP mit natürlichen KM Probleme mit der Komponentenbeschaffung für nat. Kältemittel werden kaum benannt.
Hersteller, die vielleicht in der Zukunft WP mit natürlichen Kältemitteln herstellen	Zur Entwicklung von WP mit natürlichen KM wurden von diesen Herstellern folgende Hindernisse (in abnehmender Relevanz) genannt: • Preiswertere Komponenten • Hilfe bei sicherheitstechnischer Betrachtung • Angebotserweiterung bei Komponenten • Überarbeitung der Sicherheitsnormen • Verbesserte Förderung für Kunden • Verbesserte Forderung der Hersteller • Hilfe bei technischer Auslegung Angemerkt wurde der fehlende Druck von politischer Seite, wie z.B. fehlende Steuern auf FKW/HFKW. Neben natürlichen KM werden von den Herstellern auch Entwicklungen hinsichtlich HFOs bzw. andere Low GWP KM bedacht.

Herstellergruppe	Aussagen
Hersteller, die WP mit natürlichen Kältemitteln anbieten	Als Wünsche und Forderungen zur Verbesserung der Marktsituation von WP mit natürlichen KM wurden von diesen Herstellern folgende Punkte benannt: • Besser Förderung der Kunden, welche sich eine solche WP aufstellen (z.B. 500 €/WP) • Überarbeitung der Sicherheitsnormen • Hilfe bei sicherheitstechnischer Beratung • Angebotserweiterung der Komponenten / Preiswerte Komponenten
Hersteller, die WP mit natürlichen Kältemitteln aus dem Programm genommen haben	Gründe WP mit natürlichen KM wieder aus dem Programm zu nehmen waren z.B.: • technische Probleme mit dem Verdichter (unerklärliche Ausfälle) • Lange Lieferzeiten für Komponenten • Partner zur Serviceübernahme schwer zu finden (als kleine Fa.) Sehr viele zufriedene Kunden wurden trotzallem auch erwähnt.

Expertenbefragung – Nutzer von Endgeräten

Die von Shecco durchgeführte Befragung (Shecco 2012) zielte vorrangig auf Anwender ab. Hierzu zählen insbesondere Unternehmen aus Handel und Nahrungsmittelproduktion sowie global agierende Gastronomiebetriebe.

Als fehlende Anreize wurden insbesondere benannt:

- ähnliche gesetzliche Reglungen zum Phase-Down von HFKWs entsprechend dem Montreal-Protokoll für FCKWs
- Regelung durch die Eco-Design-Richtlinie aufnehmen
- Steuern auf HFKW

Als Hindernisse werden im Allgemeinen noch gesehen:

- Verfügbarkeit von geschultem Servicepersonal
- Verfügbarkeit von entsprechenden Anlagen zu konkurrenzfähigen Preisen

Als weitere Empfehlungen werden genannt:

- Einführung von hybriden Kältesystemen in einem ersten Schritt (z.B.: CO_2-R134a – Kaskaden)
- Training von Kälteanlagenbauern und Handwerkern an Anlagen mit natürlichen Kältemitteln, Zertifizierung von Anlagen mit natürlichen KM unterstützen
- Entwicklung preisgünstiger Kompaktanlagen (Serienprodukte mit hohen Stückzahlen)
- Schulung von Entwicklern, Planern, Servicepersonal und Anwendern

Expertenbefragung - Kältefachbetriebe und Kälteanlagenbauer

Im Zuge einer Informationsveranstaltung eines großen deutschen Kältefachhandel-Unternehmens zum Vorschlag der EU-F-Gase-Verordnung im März 2013 konnte aus einzelnen Gesprächen und Fragen während der Vorträge ein guter Überblick zur perspektive der Kältefachbetriebe gewonnen werden. Hierbei wurden zwei Punkte weniger als Hemmnis denn als Notwendigkeiten zur Umsetzung der vorgeschlagenen F-Gase-Verordnung benannt:

- Ausbildung zu den Besonderheiten der natürlichen Kältemittel: Die FKWs sind in ihrer Handhabung weitestgehend identisch. Für die natürlichen Kältemittel sind sowohl gegenüber HFKWs als auch untereinander viele Eigenheiten zu berücksichtigen. Grundlegend ist hierbei zwischen den reinen Kohlenwasserstoffen, Ammoniak und CO_2 zu unterscheiden.
- Die zusätzlich notwendige Ausstattung und Werkzeuge für alle Arbeiten an Anlagen mit Kohlenwasserstoffen, Ammoniak und CO_2 als Kältemittelneben den bestehenden HFKW-Anlagen wird als ein besonderes Problem gesehen. Bereits heute sind Service-Fahrzeuge von Kältemonteuren erheblich mit Ausrüstungen, Werkzeugen und Kältemittelbehältern beladen. Anschaffung, Unterbringung und Handling der zusätzlichen Ausrüstung stellen ein zu berücksichtigendes Problem dar.

Handlungsempfehlung

Aus den Expertenbefragungen können wichtige Handlungsempfehlungen abgeleitet und wie folgt zusammengefasst werden:

- **Gesetzliche Reglungen zum HFKW-Phase Down**
- **Gesetzliche Reglungen zum GWP-gerechten Besteuerung (siehe Kältemittelkosten im Abschnitt „Wirtschaftliche Hindernisse" ab Seite 200.**
- **Berücksichtigung der direkten TEWI-Emissionen in den EcoDesign-Richtlinien ENTR Lot 1 und Lot 6 (Im Bereich der Raumklimageräte bis 12 kW (ENTR Lot 10) werden diese über eine SEER-Bonus für Geräte mit einem Kältemittel mit einem GWP < 150 berücksichtigt (EC, 2012b))**
- **Die Ausbildung von Kältetechnikern (Facharbeiter) muss um die Problematik von natürlichen Kältemitteln erweitern bzw. vertieft werden**
- **Förderung der Entwicklung Seriengeräten mit hohen Stückzahlen (z.B. Mono-Split-Klimageräte, Kaltwassersätze kleiner Leistung)**
- **Förderung der Entwicklung / Pilotprojekte großer Anlagen, ggf. mit Kombination FKW+nat. KM**

9.2.4 Technische Hindernisse

Für den Einsatz natürlicher Kältemittel in Kälte- und Klimaanlagen existieren aufgrund der spezifischen Kältemitteleigenschaften verschiedene technische Hindernisse. Ein wesentlicher Teil umfasst die Sicherheitsaspekte explosiver, brennbarer und/oder toxischer Kältemittel. Sich daraus ableitende Anforderungen legt beispielsweise die DIN EN 378 fest. Die folgende Tabelle fasst diese für die einzelnen Gruppen natürlicher Kältemittel mit ihren Stoffeigenschaften und den damit verbundenen technischen Anforderungen zusammen. Diese Anforderungen können durch technische Maßnahmen weitgehend erfüllt werden, welche jedoch Aufwand und Kosten erhöhen. Darüber hinaus besteht in einigen Bereichen weiterer Forschungsbedarf, z.B. im Bereich der Nutzung der Entspannungsarbeit bei R744-Kälteanlagen, aber auch in der sicherheitstechnischen Bewertung von natürlichen Kältemitteln wie R723.

Tabelle 38: Natürliche Kältemittel und technisch zu berücksichtigende Eigenschaften

Kältemittel / Kältemittelgruppe	Stoffeigenschaft	Anlagenseitige Erfordernisse
Kohlenwasserstoffe (z.B. R290, R1270, R601, RE170)	explosiv	Ex-Schutz-gerechte Ausführung sichere Abführung möglicher Kältemittelleckageströme Gassensoren mit Sicherheitsabschaltung
Kohlendioxid R744	sehr tiefe Siedetemperatur -> hohe Drucklage in Kälteanlagen (Anlagendrücke > 100 bar)	Werkstofffestigkeit
	niedrige kritische Temperatur (ca. 31 °C)	Transkritischer Betrieb inkl. Druckreglung, Gaskühler und zusätzlichen Kreislaufschaltungen zum Erreichen akzeptabler COPs (Innere Wärmetauscher, Entspannungsmaschinen oder Ejektoren)
Ammoniak R717	giftig	Gasdetektoren
	Brennbarkeit	Anlage zur Lösung möglicher Leckageströme in Wasser
	starke Lösungswirkung	keine Kupfer- oder Messingwerkstoffe verwendbar
Wasser R718	niedrige Dampfdrücke (9 mbar bei 6 °C)	große Rohrquerschnitte große schnelllaufende Turboverdichter entgasungsfreie Werkstoffe

Handlungsempfehlungen

Zur weiteren Marktdurchdringung von Anlagen mit natürlichen Kältemitteln besteht an vielen Stellen Forschungsbedarf. Einige Ansätze sollen hier aufgezeigt werden.

Unter dem Gesichtspunkt reduzierter Heiz- und Kühllasten stellen fassadenintegrierte, kombinierte Lüftungs- und Klimageräte mit Propan als Kältemittel einen interessanten Ansatz dar. Im Fall einer erkannten Leckage kann ein Luftstrom nach außen initiiert werden, welcher das Entstehen eines explosiven Gemisches im Innenraum verhindert. Durch die vollständige Fertigung des Kältekreislaufes beim Hersteller können lösbare Verbindung vollständig vermieden werden, eine hermetische Kreislaufgestaltung ist möglich wie bei Haushaltskältegeräten.

Die Füllmengenreduzierung stellt einen wichtigen Schritt zur Einführung, insbesondere brennbarer, natürlicher Kältemittel in weitere Kälteanlagentypen dar. Hierzu liegen Ansätze vor, welche im Wesentlichen die Wärmeübertrager betreffen. Z.B.: luftbeaufschlagte Verdampfer auf MPE-Rohr-Basis (problematisch ist hierbei die gleichmäßige Kältemittelverteilung auf eine Vielzahl von Mikrokanälen) sowie asymmetrische Plattenverdampfer und -kondensatoren.

9.2.5 Wirtschaftliche Hindernisse

Kälte- und Klimaanlagen mit HFKW stellen heute Standardlösungen dar. Anlagen mit natürlichen Kältemitteln gelten in vielen Bereichen, durch den bisherigen geringen Marktanteil als Speziallösungen. Einige der natürlichen Kältemittel benötigen zusätzliche sicherheitstechnische Einrichtung (z.B. Gasdetektoren, Abzug, Einhausung). Hieraus folgen im Allgemeinen höhere Investitionskosten gegenüber vergleichbaren HFKW-Kälteanlagen (z.B. 30 - 60 % lt. Aussage eines dt. Herstellers von R290 Kälteanlagen).

Durch folgende betriebskostensenkende Effekte ist eine Amortisation der Zusatzkosten möglich:

- Verminderte Wartungskosten durch geringeren Dichtheitsprüfungsaufwand

- Verminderte Energiekosten durch mögliche höhere Anlageneffizienz (insbesondere R717, R723, nach Herstellerangaben auch bei dem Einsatz von R290, siehe 143)
- Verminderte Kältemittelkosten durch Kostenvorteile von natürlichen Kältemitteln
- Weitere Vorteile durch spezifische Kältemitteleigenschaften

Dichtheitskontrollen

Die F-Gase-Verordnung hat die Minderung der Emissionen fluorierter Treibhausgase zum Ziel. Als eine Maßnahme verpflichtet sie Betreiber von Kälteanlagen, welche fluorierte Treibhausgase enthalten, zu regelmäßigen Dichtheitsprüfungen und deren Protokollierung. Die Häufigkeit der Prüfungen hängt von der Füllmenge ab.

Tabelle 39: Anforderungen an Dichtigkeitskontrollen nach F-Gase-Verordnung (VO EG 842/2006)

Füllmenge	Anforderung
3 - 30 kg (ab 6 kg bei hermetisch geschlossenen Anlagen)	jährliche Kontrolle
30 - 300 kg halbjährliche Kontrolle	halbjährliche Kontrolle, bzw. jährlich bei vorhandenem Leckage-Überwachungssystem
über 300 kg	vierteljährlich Kontrolle, bzw. halbjährlich bei vorhandenem Leckage-Überwachungssystem

Laut Artikel 3 sind zur Dichtheitskontrolle direkte als auch indirekte Messmethoden zugelassen. Es sind „in erster Linie die Teile der Einrichtung oder des Systems, an denen am ehesten Lecks auftreten können, zu prüfen“. Die hierbei zugelassenen Messmethoden sind in der EG-Verordnung 1516/2007 aufgelistet. Sie unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Erkennungsgenauigkeit teilweise um mehrere Größenordnungen. Für direkte Methoden ist die praktische Durchführung zu hinterfragen, da oft schon aus baulichen Gründen Prüfungen nur eingeschränkt möglich sind. Indirekte Messmethoden sind nur im Falle „zuverlässiger Hinweise“ auf Leckagen zu verwenden. Als Messmethoden wird hierbei die Analyse „einer oder mehrerer der folgenden Parameter“ verstanden. Zu den möglichen Parametern zählen: Druck, Temperatur, Kompressorströmung, Flüssigkeitsniveau und/oder Auffüllmenge.

Anzumerken ist, dass auch durch regelmäßige Dichtheitskontrollen Kältemitteltotalverluste, insbesondere durch plötzlich auftretende Havarien an der Kälteanlage, nicht auszuschließen sind.

Eine hohe Dichtheit einer Kälteanlage bzw. eine stets optimale Füllmenge sind entscheidend für einen effizienten und wirtschaftlichen Anlagenbetrieb. Aus diesem Grund sind regelmäßige Dichtheitsprüfungen auch an Kälteanlagen mit natürlichen Kältemitteln angebracht. Ebenso ist eine hohe Dichtheit von Kälteanlagen unter dem Sicherheitsaspekt für Anlagen mit brennbaren bzw. toxischen Kältemitteln erforderlich.

Ausgehend von den weichen Formulierungen der EG-VO 842/2006 und EG-VO 1516/2007 und den daraus hervorgehenden Freiräumen für die Durchführung der vorgeschriebenen Dichtheitskontrollen sind keine bzw. nur minimal höhere Wartungskosten für Kälteanlagen mit HFKWs gegenüber natürlichen Kältemitteln zu erwarten.

Energiekosteneinsparung durch höhere Anlageneffizienz

Die Ergebnisse des theoretischen Vergleichs der Kältemittel (Abschnitt 6.2.1 Vergleich von Kältemitteln, Seite 88 ff) bzw. der Simulation verschiedener Anlagensysteme zeigen, dass bei vergleichbarer Kreislaufgestaltung und vergleichbaren Komponenten nur für die Kältemittel R717 und R723 höhere Leistungszahlen gegenüber R134a erreicht werden. Bei Vergleichen mit den Kältemitteln R404a bzw. R410A, die wegen ihrer höheren volumetrischen Kälteleistung und der damit verbundenen kleineren Komponenten R134a vorgezogen werden, erreichen auch die Kältemittel R290 oder R1270 höhere Leistungszahlen.

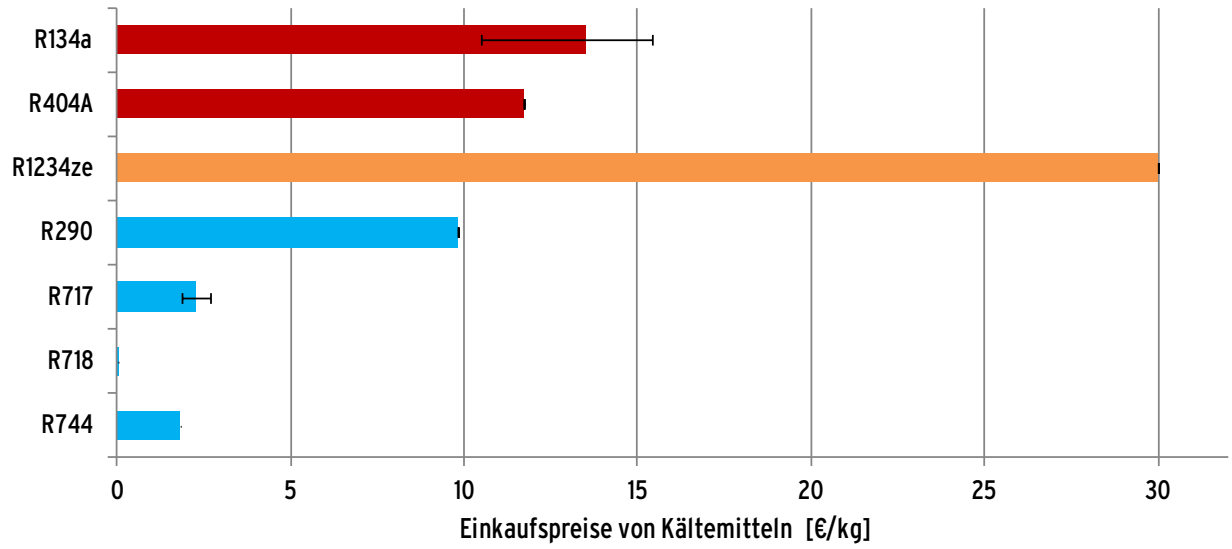
Für die Kältemittel R718 und R744 sind bereits zum Erreichen der Leistungszahlen von R134a Modifikationen bzw. Zusatzkomponenten am Kältekreislauf notwendig. Für R718 ist hier z.B. die zweistufige Ausführung mit Zwischenkühlung zu nennen, für R744 beispielsweise ein innerer Wärmeübertrager, eine Expansionsmaschine oder ein Ejektor.

Relevante Energiekosteneinsparungen sind aufgrund der nur geringfügig höheren Leistungszahlen (bei vergleichbarer Kreislaufgestaltung) nur bei hohen Betriebsstundenzahlen, wie sie ggf. im Bereich der Industriekälte vorkommen, zu erwarten. Jedoch ist aufgrund der anzunehmenden Aufgeschlossenheit bzw. des höheren Interesses am Thema Kälteversorgung bei Betreibern von Anlagen mit natürlichem Kältemittel mit einer effizienteren Betriebsweise der Anlagen zu rechnen. Dieser kann z.B. durch verschiedene Regelalgorithmen-Anpassungen erreicht werden.

Kältemittelkosten

Zu Beurteilung der verminderten Kosten für die Kältemittelfüllung sind die in Abbildung 123 dargestellten Kosten für die Kältemittel in Deutschland relevant. Die spezifischen Kosten sind für R717 und R744 um fast eine Größenordnung, für R718 um mehrere Größenordnungen gegenüber gängigen HFKWs kleiner. R290 weist gegenüber HFKWs nur geringe Kostenvorteile auf. Verglichen mit dem HFKW R1234ze betragen die Kosten von R290 nur etwa 30 %.

Abbildung 123: Kosten für Kältemittel

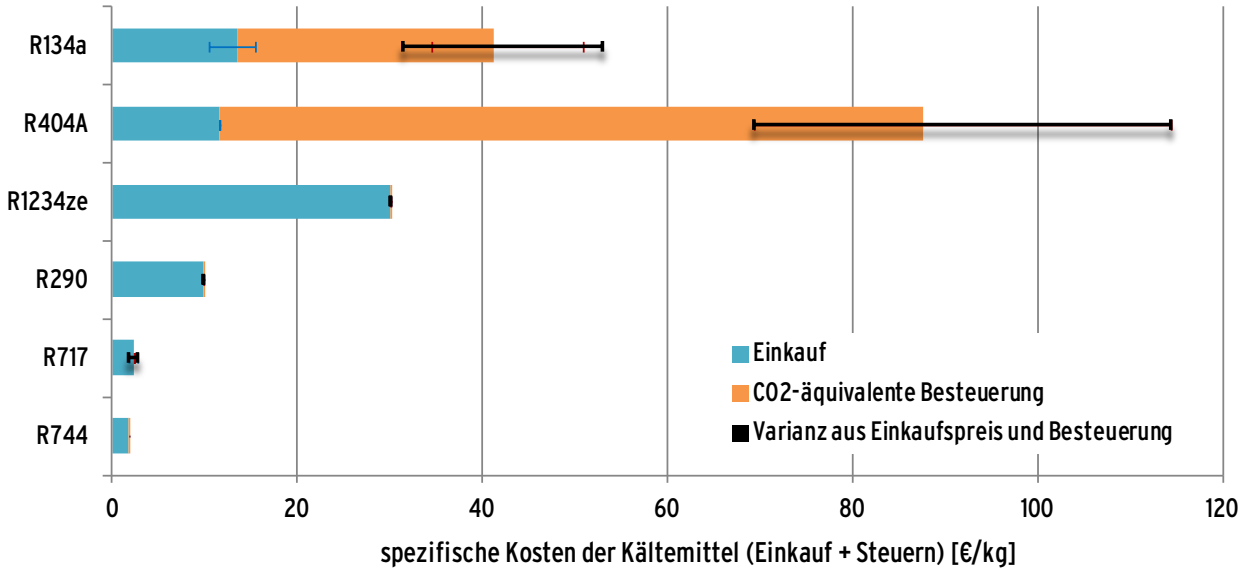


Die Einkaufpreise ergeben sich aus Anfragen des ILK Dresdens bei drei Großhandelsunternehmen der Kältebranche im Zeitraum Januar bis Dezember 2012

Ausgehend von Abbildung 118 ergeben sich für Klimageräte der Leistungsklasse bis 10 kW Füllmengen von maximal 1,5 kg. Wird R290 anstelle von R404A verwendet, ergeben sich Einsparpotenziale von maximal 3 €. Vergleicht man für einen Kaltwassersatz mit einer Kältemittelfüllmenge von 50 kg den Einsatz von R134a gegenüber R717, so liegen die Einsparpotenziale im Bereich von ca. 500 €. Der Kostenvorteil von natürlichen Kältemitteln gegenüber HFKWs ist daher minimal im Vergleich zu den Anlagenkosten. Durch die derzeitigen hohen Preise ungesättigter HFKW (z.B. R1234ze) ergeben sich hier stärker zu berücksichtigende Einsparpotenziale. Ein ausreichender wirtschaftlicher Vorteil ist jedoch auch hier nicht zu erwarten.

Abbildung 124 vergleicht die spezifischen Gesamtkosten für verschiedene Kältemittel unter Einbeziehung einer CO_2-äquivalenten Besteuerung. Die dargestellten Steuersätze ergeben sich aus dem Mittelwert der Steuersätze in den Ländern, in denen es bereits rechtsverbindliche Regelungen gibt. Dargestellt sind ebenfalls die Varianzen bezüglich Einkaufspreis (blaue Fehlerbalken), Steuersätze (rote Fehlerbalken) sowie die resultierende Varianz des Gesamtpreises (schwarzer Fehlerbalken).

Abbildung 124: Spezifische Kältemittelkosten bestehend aus Einkaufspreis und CO2-äquivalenter Besteuerung



Die Einkaufpreise ergeben sich aus Anfragen des ILK Dresdens bei drei Großhandelsunternehmen der Kältebranche im Zeitraum Januar bis Dezember 2012, die CO_2-äquivalenten Besteuerung wurden entsprechend der Gesetzte in den in Abschnitt 9.2.2 Anreize zur Anwendung natürlicher Kältemittel – Einschränkungen zur Anwendung von HFKW-Kältemitteln genannten Ländern berechnet.

Durch den Anteil, der sich aus einer GWP-gerechten Besteuerung ergäben, erhöhten sich die Kosten für R404A um einen Faktor 6, für R134a etwa um einen Faktor 2-3. Hieraus ergäben sich für die natürlichen Kältemittel deutliche Kostenvorteile. Betrachtet man die o.g. Beispiele, ergäbe sich für ein Klimagerät mit 1,5 kg Füllmenge bereits eine Einsparung von etwa 100,- €. Speziell bei Serienprodukten ist dieser Kostenvorteil bereits als starker Anreiz zu bewerten.

Für den Kaltwassersatz mit 50 kg R134a ergäben sich nicht mehr vernachlässigbare Kosteneinsparungen von etwa 1.250,- €.

Wirtschaftliche Vorteile basierend auf spezifischen Kältemitteleigenschaften

Wirtschaftliche Vorteile aus weiteren spezifischen Kältemitteleigenschaften ergeben sich hauptsächlich für das Kältemittel R744. Durch die hohe Drucklage und die damit verbundene hohe

volumetrische Kälteleistung sind kleine Leitungsquerschnitte und Verdichterhubvolumina realisierbar. Hierdurch ergeben sich relevante Kostenvorteile insbesondere für direktverdampfende Systeme mit langen Leitungslängen (z.B. Multi-Split-Systeme, Industriekältesysteme)

Durch aktuelle Entwicklungen bei R718-Kälteanlagen ist die Speicherung von Kälte in Form von pumpfähigen Wasser/Eis-Gemischen möglich. Durch die Eiserzeugung im Direktverdampfungsprozess (das Kältemittel ist gleichzeitig das Speichermedium) sind hohe Leistungszahlen bei der Kälteerzeugung aufgrund hoher Verdampfungstemperaturen realisierbar. Diese Vorteile können insbesondere im Fall niedriger geforderter Kältetemperaturen (etwa -2 - 6 °C) genutzt werden. Durch eine Speicherbeladung in der Nacht können weiterhin günstige Kondensationsbedingungen und möglichen Energieüberschüsse im Stromnetz genutzt werden.

Förderung von Investitionskosten für gewerbliche Kälteanlagen

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit verabschiedete zum 1. Januar 2009 die Richtlinie zur Förderung von gewerblichen Kälteanlagen (BMU & BAFA 2009). Hierbei werden Maßnahmen und Anlagen gefördert, die Elektroenergieeinsparungen von mindesten 35% gegenüber dem bisherigen Bedarf erreichen. Wesentliche Merkmale und Bedingungen der Förderung sind im Folgenden wiedergegeben:

- **Maßnahmen an Altanlagen** werden unter der Voraussetzung einer **Energieverbrauchsminderung von mindesten 35%** gefördert. Der **Elektroenergiebedarf** muss vor Maßnahmenbeginn **150.000 kWh/a** überschreiten. Die **Förderung** der Nettoinvestionskosten beträgt **15%**. Ein **Bonus** von **zusätzlich 10% wird bei Anlagen mit R717, R744 oder nichthalogenierten Kältemitteln** (hierzu sind alle derzeit üblichen natürlichen Kältemittel zu zählen) gewährt.
- **Neuanlagen** werden **nur unter der Voraussetzung der Verwendung natürlicher Kältemittel** gefördert. Die Gesamteffizienz muss durch eine TEWI-Berechnung durch den Hersteller oder einen unabhängigen Dienstleister nachgewiesen werden. Der vorab ermittelte Jahreselektroenergiebedarf muss 100.000 kWh/a bzw. die Jahreskosten für den Elektroenergiebedarf (inkl. Leistungspreis) 10.000 €/a überschreiten. Die **Fördersumme beträgt 25% der Nettoinvestitionskosten**.
- Wird die **Kältemaschinenabwärme** (Enthitzung und Kondensation) betriebsintern z.B. zur Brauchwassererwärmung **genutzt**, ist eine **zusätzliche Bonusförderung von 10%** der Nettoinvestitionskosten möglich
- Weitere Anforderungen betreffen einen separaten Energiezähler, die Wartung und verwendete Isolationsstoffe für Kühlräume (keine Verwendung treibhauswirksamer Gase)

Da die Fördersumme auf die Nettoinvestitionskosten des gesamten Kältesystems (inklusive Kälteverteilsystem und Gebläsekonvektoren) bezogen wird, können bei geförderten Projekten die oben zitierten Mehrkosten von Anlagen mit natürlichen Kältemitteln vollständig aufgefangen werden.

Die geforderten Mindestverbräuche bei Neuanlagen erfordern in Abhängigkeit des Einsatzgebiets teilweise hohe installierte Leistungen. Bei Kaltwassersätzen für die Klimatisierung mit ca. 500 Volllaststunden pro Jahr ist eine installierte Kälteleistung von

200 kW notwendig, für Kälteanlagen im Industriebereich ca. 40 kW bei durchschnittlich 30 % Volllast. Eine Förderung von kleineren Anlagen würde insbesondere Kaltwassersätzen mit natürlichen Kältemitteln im Klimabereich zu einer höheren Serienverfügbarkeit verhelfen.

Die Forderung eines separaten Energiezählers ist positiv zu bewerten. Ein zusätzlich installierter Kältemengenzähler würde Aufschluss über die erreichte Kälteerzeugungseffizienz geben.

Zusammenfassung

Ein wesentlicher Nachteil von Kälte- und Klimaanlagen mit natürlichen Kältemitteln sind die vergleichsweise hohen Investitionskosten. Diese sind durch sicherheitstechnische Anforderungen, spezifische Kältemitteleigenschaften sowie die nicht vorhandenen serienmäßige Marktverfügbarkeit bedingt. Mögliche bisherige betriebswirtschaftliche Vorteile sind als gering einzuschätzen und reichen im Allgemeinen nicht für eine notwendige finanzielle Amortisation der Investition. Mit der seit 2009 vorhanden Investitionsförderung ist für größere Kälteanlagen, speziell im Industriekältebereich, ein wichtiges Instrument für eine größere Nachfrage nach Anlagen mit natürlichen Kältemitteln und ein damit einhergehendes größeres Angebot geschaffen worden. Eine zeitlich begrenzte Ausweitung auf Geräte kleinerer Leistung ist ratsam, um das Angebot marktverfügbarer Serienprodukte mit natürlichen Kältemitteln zu vergrößern.

Handlungsempfehlung

Erweiterung der Investitionsförderung auf Neuanlagen bzw. Retrofit-Anlagen mit natürlichen Kältemitteln mit kleiner Leistung. Ein Nachweis der Energieeffizienz analog der Wärmepumpenförderung ist einzubeziehen.

GWP-gerechte Besteuerung von Kältemittel als ein transparentes Werkzeug mit zusätzlichem Anreiz zur höheren Anlagendichtheit und Verwendung natürlicher Kältemittel.

Verschärfung der geforderten Aufwendungen zur Dichtheitskontrolle von Anlagen mit HFKW-Kältemitteln.

9.3 Ab- und Adsorptionskälteanlagen

9.3.1 Sicherheitstechnische Hemmnisse

Hier ist zwischen Ammoniak-Wasser-AbKM und Wasser-Lithiumbromid-AbKM bzw. AdKM zu unterscheiden. Für Ammoniak-Wasser-AbKM sind die in Abschnitt 9.2.1 ab Seite 183 genannten Vorschriften aus der DIN EN 378 für Ammoniak als Kältemittel zu berücksichtigen.

Lithiumbromid fällt unter die Wassergefährdungsklasse 2. Hieraus entsteht kein Bedarf für zusätzliche Sicherheitsvorkehrung, welche als Hemmnisse für die Anwendung von LiBr-Wasser-AKM angesehen werden können.

Von den in Adsorptionskältemaschinen verwendeten Sorbentien Silikagel und Zeolith gehen keine Gefahren für Mensch und Umwelt aus. Daher liegen diesbezüglich auch keine Hemmnisse für deren Anwendung vor.

9.3.2 Anwendungstechnische Hemmnisse

Temperaturabhängiges Anlagenverhalten – Verfügbarkeit von Antriebswärme

Absorptionskälteanlagen besitzen ein Anlagenverhalten, welches stark von den Temperaturbedingungen der äußeren Medien abhängig ist. Die Kälteerzeugung stellt daher Anforderungen an Rückkühlung sowie an die Wärmeversorgung. Hieraus entsteht in vielen Bereichen eine Einschränkung:

- Die Wärmequellen müssen entsprechende Temperaturniveaus und Wärmeleistungen aufweisen.
- Die Wärmeversorgung muss über den geplanten Nutzungszeitraum der AKM verfügbar sein. Diskontinuitäten über den Tag sind in Grenzen mit Speichersystemen kompensierbar. Diskontinuitäten über längere Zeiträume bzw. Unsicherheiten zur zukünftigen Entwicklung des Kältebedarfs bzw. der Wärmebereitstellung, stellen ein starkes Hemmnis dar.

Berücksichtigt man bei BHKWs nur die recht einfach auskoppelbare Motorabwärme, liegen die Temperaturen etwa bei 85 bis 90 °C. Zum Erreichen hoher Wärmeverhältnisse für den Anwendungsfall Klimatisierung ist der Betrieb mit höheren Kaltwassertemperaturen, wie beispielsweise 10 / 14 °C vorteilhaft. Diese Betriebsweise erfordert jedoch angepasste Kälteübergabesysteme im Gebäude.

Handlungsempfehlung

Die Planung von Klimasystemen für den Betrieb mit höheren Vorlauftemperaturen stellt eine wichtige Voraussetzung für einen ökologischen und wirtschaftlichen Betrieb von AKMs im Bereich der Klimatisierung dar. Da höhere Vorlauftemperaturen auch energetische Vorteile für Kompressionskälteanlagen ergeben, ist die Verbreitung solcher Systeme (z.B. Bauteilaktivierung, Kühlecken) notwendig. Hier kann insbesondere im Bereich öffentlicher Bauvorhaben eine hohe Vorbildwirkung erzielt werden. Die Einbeziehung im Rahmen der Lehre (Studium TGA) ist notwendig.

Platzbedarf

Da Ab- und Adsorptionskälteanlagen eine höhere Anzahl an Wärmeübertragern beinhalten und durch die Verwendung von Wasser als Kältemittel (AdKM, sowie Wasser-LiBr-AbKM) größere Strömungsquerschnitte erforderlich sind besitzen diese Anlagen ein größeres Bauvolumen als Kompressionskältesysteme mit vergleichbarer Kälteleistung. Hinzu kommt der Bedarf an größeren Rückkühlwerken und zusätzlicher Hydraulik durch die benötigten Heizwasserleitungen.

Handlungsempfehlung

Entwicklungsförderung für die Reduzierung des Wärmeübertragerbauvolumens. Hierbei bieten Verfahren wie z.B. neuartige Beschichtungsverfahren für das Aufbringen des Sorbens auf das Wärmeübertragermaterial bei der Adsorption sowie durch oberflächenstrukturierte Wärmeübertrageroberflächen bei der Absorption zahlreiche Möglichkeiten.

Zur Reduzierung des zusätzlich notwendigen Anlagenaufwands sind die Entwicklung von direkt luftgekühlten AKM und intelligenten Rückkühlsystemen von Bedeutung. In diesem Bereich gibt es bereits laufende Forschungsaktivitäten,

jedoch auch noch ein großes Potenzial. Durch die Reduzierung des Anlagenaufwands wird zusätzlich eine Reduzierung des elektrischen Zusatzenergiebedarfs erreicht.

Effizienz und Einsatzgrenzen

Mit den bisher eingesetzten Stoffpaaren Ammoniak/Wasser, Wasser/Lithiumbromid und Wasser/ Lithiumchlorid in der Absorptionskälte sind hinsichtlich erreichbarer Wärmeverhältnisse und möglicher Einsatzbedingungen Grenzen gegeben. Die erreichbaren Wärmeverhältnisse von einstufigen NH_3/H_2O-Anlagen liegen bei etwa 0,6, die von H_2O/LiBr bzw. H_2O/LiCl bei ca. 0,7. Einsatzgrenzen für die Stoffpaare H_2O/LiBr bzw. H_2O/LiCl ergeben sich

- durch die Verwendung von Wasser als Kältemittel Kaltwasseraustrittstemp. > 0 °C und
- durch das Lösungsfeld des Wasser-Salzgemischs (Kristallisationsgrenze) eine Begrenzung der Temperaturunterschiede zwischen Kalt-, Kühl- und Heizwasser.

Mit einem Resorptionskreislauf, bei welchem der Kondensator durch einen Absorber (so genannter Resorber) und der Verdampfer durch einen Entgaser (so genannter Desorber) ersetzt wird, erlaubt auch Kaltwassertemperaturen < 0 °C (Richter 2008; Richter et al. 2011).

Neben den bekannten Stoffpaaren gelten ionische Flüssigkeiten als vielversprechende Sorbentien für Absorptionskalteanlagen und –wärmepumpen (Radspieler & Christian Schweigler 2010). Ionische Flüssigkeiten sind organische, bei Raumtemperatur flüssige Salze mit vernachlässigbarem Dampfdruck. Bei ionischen Flüssigkeiten kommen große, komplexe Ionen und Kationen zur Anwendung. Durch die Vielzahl der möglichen Kombinationen ist die Auswahl an ionischen Flüssigkeiten enorm (Merck 2005). Erste Untersuchungen an einer Absorbtionskältemaschine mit dem Stoffpaar Wasser und 1-Ethyl-3-Methylimidazolium-Ethylsulfat zeigten vielversprechende Ergebnisse, welche bisher aber noch hinter denen des Stoffpaares H_2O/LiBr zurückbleiben. Gründe hierfür sind der notwendige Anpassungsbedarf durch teilweise sehr unterschiedliche Stoffeigenschaften wie z.B. die viel höhere Viskosität und Oberflächenspannung (Radspieler & Christian Schweigler 2010).

Neben neuen Stoffpaaren stellen mehrstufige und mehreffektige Anlagen Möglichkeiten zur Anpassungen an äußere Temperaturbedingungen sowie zu einer höheren Energieausbeute dar.

Handlungsempfehlung

Förderung von Forschung und Entwicklung auf den Gebieten

- **der Absorptionskältemaschinen mit ionischen Flüssigkeiten als Sorbens und**
- **der mehrstufigen und mehreffektigen Absorptionskälteanlagen.**

Informationsmangel

In Katalogen oder auf Internetseiten von Herstellern von Kaltwassersätzen bzw. Verdichtern sind oft recht umfangreiche Informationen zur Anlagencharakteristik (Kälteleistung, Leistungszahl) in Abhängigkeit der äußeren Bedingungen (Umgebungstemperatur, notwendige Kältetemperatur) zu finden. Diese liegen zum Beispiel in Form von Diagrammen, Tabellen und teilweise auch in Form von Polynomen zur eigenen Berechnung vor.

Für Ab- und Adsorptionskälteanlagen sind Angaben zum Anlagenverhalten außerhalb des Nennpunktes nur schwer zu finden. Die starke Abhängigkeit von den äußeren Bedingungen gepaart mit dem Informationsmangel führt zu einem hemmenden Unsicherheitsfaktor. Zudem sind Betriebserfahrungen mit bestehenden Anlagen für Betreiber oder Bauherren schwer auffindbar.

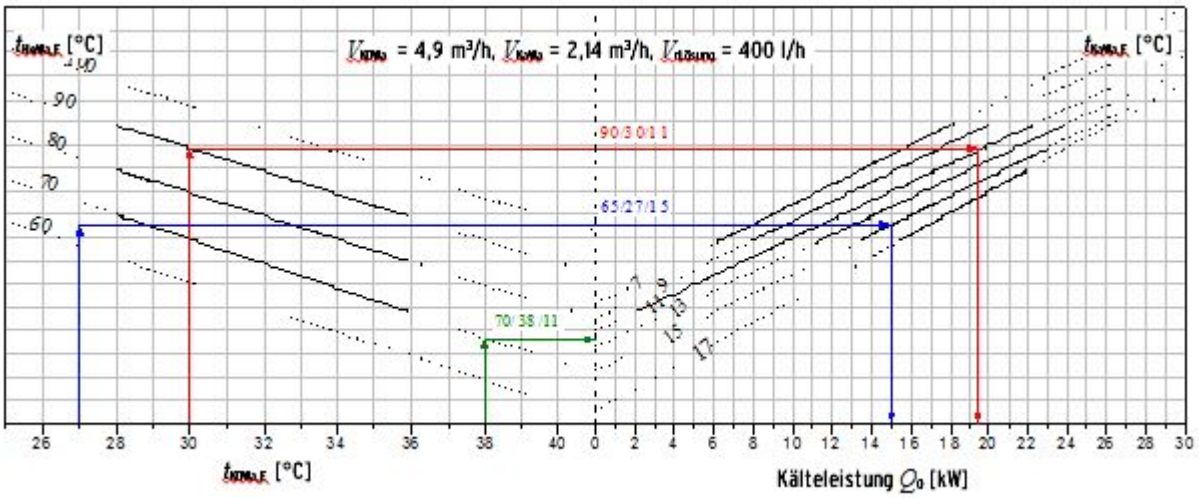
Als Ursachen für die mangelnde Information sind zwei Aspekte zu nennen:

- höhere Vermessungsaufwand durch
    1. drei statt zwei externen Medienströmen und
    2. im Vergleich zu Kompressionskälteanlagen höhere Anlagenträgheit (längere Einlaufzeit zum Erreichen des Beharrungszustands notwendig),
- komplexe physikalische Zusammenhänge, welche nur unzureichend durch einfache Polynome abgebildet werden können.

Weiterhin wird der Nennbetriebspunkt der Anlagen von den Herstellern individuell gewählt. Ein Vergleich ist daher nur eingeschränkt möglich.

Der Modellansatz der charakteristischen Gleichung bietet die Möglichkeit auf Basis weniger Messpunkte das Betriebsverhalten in anderen Temperaturbereichen vorauszuberechnen (Christian Schweigler et al. 2003; Felix Ziegler 1998). Zwar zeigen sich auch bei baugleichen Maschinen Abweichungen (Neumann et al. 2011), dennoch liefert dieser Ansatz wertvolle Informationen für Anlagenplaner und Betreiber. Angaben zum Betriebsverhalten bei unterschiedlichen Temperaturbedingungen von Seiten der Hersteller wären wünschenswert. Ein Beispiel einer geeigneten Darstellung gibt das sogenannte Leistungsnomogramm in Abbildung 125 wieder.

Abbildung 125: Leistungsnomogramm einer Wasser/LiBr-Absorptionskälteanlage (Safarik et al. 2010)



9.3.3 Wirtschaftliche Hemmnisse

Als großes Hemmnis sind die hohen Investitionskosten verglichen mit Kompressionskältemaschinen (KKM) gleicher Leistung anzusehen. Die höheren Kosten entstehen durch verschiedene Faktoren:

- Höherer Materialaufwand durch zwei zusätzliche Wärmeübertrager (Absorber, Generator), für NH_3-Wasser-Anlagen zusätzlich Dephlegmator
- Die Rückkühlung erfordert eine zwei- bis dreifach höhere Kühlleistung gegenüber KKM, hieraus ergeben sich Auswirkungen auf die Komponenten Rückkühlwerk, Kühlwasserleitung und Kühlwasserpumpe
- Zusätzliches Rückkühlwerk fast immer erforderlich, bisher nur wenige Entwicklungen von direkt-luftgekühlte AKM verfügbar
- Zusätzliches Leitungssystem zum Anschluss des Heizwassers / Heizdampfs
- Notwendige Infrastruktur zur Auskopplung der Abwärme bzw. Anschluss an das Fernwärmesystem
- In Abhängigkeit der Wärmeverfügbarkeit -> notwendige Backup-Systeme

Die im Folgenden aufgeführten Investitionskostenvorteile gleichen die oben genannten Mehrkosten in der Regel nicht aus:

- kein mechanischer Verdichter inkl. notwendiger Leistungselektronik (z.B. Frequenzumrichter)
- Vorhalten einer geringeren notwendigen elektrischen Anschlussleistung (Anteil Leistungspreis)

Zur finanziellen Amortisation sind, wie im Kapitel 7.4.3.3 diskutiert, folgende Punkte entscheidend:

- geringe Wärmebereitstellungskosten
- Minimaler Elektroenergieverbrauch notwendiger Pumpen (Stichwort elektrischer EER)
- angepasste Betriebsweise

Letztgenannter Punkt umfasst das Zusammenspiel aus Wärmebereitstellung, Kältebedarf, Rückkühlung sowie möglicher Alternativen der Kälteerzeugung.

9.4 Zusammenfassung der Handlungsempfehlungen

9.4.1 Gesetzliche Regelungen

- Die Reduzierung der direkten TEWI-Emissionen über eine Einschränkung der HFKW-Verwendung ist in vielen Bereichen möglich und technisch umsetzbar. Die von der Europäischen Kommission vorgeschlagene Novellierung der F-Gase-Verordnung beinhaltet effektive Maßnahmen zur Reduzierung der direkten TEWI-Emissionen. Erfolgt eine Umsetzung nicht in voller Gänze, sind national strengere Gesetze anzustreben.
- Maßnahmen zur Reduzierung der indirekten TEWI-Emissionen werden auf europäischer Ebene durch die Eco-Design-Richtlinien in weiten Bereichen mit abgedeckt. Die für die Kälte- und Klimatechnik notwendigen produktspezifischen Verordnungen (ENTR Lot 1 und Lot 6) befinden sich derzeit noch in der Bearbeitung. Die sich hieraus ergebenden Forderungen betreffen Mindestanforderung an die Leistungs- bzw. die Jahresarbeitszahl und im Bereich der Klimatechnik zusätzlich die Ausgestaltung von Regelungseinrichtungen.

- Verschärfung Dichtheitskontrollen bei HFKW-Anlagen: Die Vielzahl der zulässigen Verfahren sind nicht in der Lage Leckagen frühzeitig zu detektieren. Zudem ist bei technischer Verfügbarkeit von indirekten Leckagedetektiersystemen (Messung und Analyse von Anlagenparametern während des Betriebes durch die Anlagensteuerung) die Anwendung bei entsprechend großen Füllmengen vorzuschreiben.
- Einführung von GWP-gerechter Besteuerung von Kältemitteln: Beträge ab etwa 20 €/t CO_2-Äquivalent ergeben eine wirkungsvolle Lenkungswirkung, der derzeitige Preis von CO_2-Emissionsrechte-Zertifikaten an der EEX liegt bei 4,20 €/t CO_2-Äquivalent (Stand März 2013). Durch eine Ausführung der Besteuerung als Pfand werden Anstrengungen für eine hohen Anlagendichtheit und eine möglichst vollständige und sachgemäße Entsorgung gefördert.
- Einführung zu verpflichtender Aufzeichnung von Kälte- und Antriebsleistung von Kälteanlagen großer Leistung, als Nachweis für die erreichten Leistungszahlen / Jahresarbeitszahlen und als Basis für die Planung und Bewertung von Energieeinsparmaßnahmen

9.4.2 Forschungsförderung – Schwerpunkte

- Hybride Kältekaskaden bestehend aus Absorptions- und Kompressionsstufe mit dem Ziel des AKM-Betriebs im optimalen Betriebsbereich und Nutzung der Vorteile von Kompressionskältemaschinen hinsichtlich der Leistungszahlen bei kleinen Temperaturdifferenzen
- Kompakte Klimageräte mit natürlichen Kältemitteln (insbesondere R290)
- Kompressionskältekaskaden mit natürlichen Kältemitteln in Hoch- und Niedertemperaturstufe
- Leckagedetektiersysteme auf Basis von Betriebsmessdaten und Einbeziehung von Vorausberechnung der zu erwartenden Betriebszustände in Abhängigkeit der äußeren Bedingungen.
- Förderung von Entwicklungen zur Kältefüllmengenreduzierung
- Einbeziehung von freien Kühlsystemen in Kältesystemen
- Kältesysteme mit Nutzung der verfügbaren Arbeitsfähigkeit von R744 bei der Expansion
- Kältespeichersysteme zur Entkopplung von Energieangebot und Energiebedarf sowie zur Nutzung von günstigen Umgebungsbedingungen zur Kälteerzeugung
- Felduntersuchungen zu tatsächlichen Leckagen, der Häufigkeit und Ursachen
- Monitoring von Kälteanlagen mit HFKW und natürlichen Kältemitteln zum Vergleich der Energieeffizienz im praktischen Anlagenbetrieb
- Absorptionskälteanlagen mit neuen Stoffpaaren auf Basis von *Ioniq Liquid*
- Mehrstufige und mehreffektige Absorptionskälteanlagen
- Baugrößenreduzierung von thermisch angetriebenen Kältemaschinen, z.B. durch neue Wärmeübertrager-Bauformen

- Offene dezentrale Sorptionsverfahren zur einfachen Raumintegration auch ohne Luftkanalanbindung

9.4.3 Förderung der Wirtschaftlichkeit

- Ausschöpfung der gesetzlichen Möglichkeiten um die Umweltaspekte von HFKWs monetär für den Betreiber abzubilden (siehe Gesetzliche Reglungen bezüglich Verschärfung Dichtheitskontrollen und GWP-gerechte Besteuerung der Kältemittel)
- Investitionsförderung für Anlagenbetreiber bei der Errichtung von Kälteanlagen mit natürlichen Kältemitteln. Für Großanlagen sollten Bedingungen wie ein integriertes Monitoring-System verbindlich werden

10 Quellenverzeichnis

BKWK, Bundensverbrand Kraf-Wärme-Kopplung e.V., 2011. *Neue Chancen mit Kraft-Wärme-Kopplung in der Industrie - effizient produzieren - nachhaltig wirtschaften*,

Mictom Ltd / Co. KG, 2010. Technische Begriffserklärung. verfügbar unter: http://www.mictom.co.uk/dictionary.php?l=de.

AG-Energiebilanzen-e.V., 2011. Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2009. Available at: http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=63.

AGFW, 2010. *AGFW-Arbeitsblatt FW 309 Teil 1 (Energetische Bewertung von Fernwärme)*, AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.

AGFW, 2010a. Fernwärme-Preisübersicht, AGFW - Der Energieeffizienzverband für Kraft Wärme Kälte und KWK e.V.

AIA, A.I.A., 2008. Trockener Rückkühler - Modelle XP120.

Asmus, S., 2010. Rückkühlsysteme.

ASUE, 1995. *Absorptionskälteanlagen - Grundlagen und Referenzen*, Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.

ASUE, 2011. *BHKW-Kenndaten 2011*, Stadt Frankfurt am Main -Der Magistrat- Energiereferat Energiekonzepte Versorgungstechniken.

Baskaran, A. & Mathews, P.K., 2012. A performance comparison of vapour compression refrigeration system using eco friendly refrigerants of low global warming potential. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2, p.8.

BBU, V.B.-B.W.E.V., 2009. BBU-Preisdatenbank: Energie immer Teurer.

Becken, K. & Plehn, W., 2010. *Fluorierte Treibhausgase vermeiden - Wge zum Ausstieg*, Umweltbundsamt

Birndt, R., 1999. *Dichtheit von Kälteanlagen*, ILK Dresden, Forschungsrat Kältetechnik.

Bitzer-Kühlmaschinenbau, 2012. *Kältemittel-Report 17*,

BMJ, B., 2011. *Gesetz über die Bereitstellung von Produkten auf dem Markt (Produktsicherheitsgesetz - ProdSG)*,

BMU & BAFA, B. für U.N. und R., 2009. *Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen an gewerblichen Kälteanlagen*,

BMVBS, B. für V.B. und S., 2007. *Leitfaden für Energiebedarfsausweise im Nichtwohnungsbau*,

BMWI, 2010. *Energie in Deutschland - Trends und Hintergründe zur Energieversorgung*, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie.

Brinckmann, K., 2008. Einsatz von Absorptionskälteanlagen in industriellen Energieversorgungssystemen der Halbleiterindustrie - 10 Jahre Betriebserfahrungen mit Höhen und Tiefen. *Chillventa - ILK Kollogium*.

Brouwers, C., 2009. Sicher in die Zukunft - CO2 - das natürliche Kältemittel für Supermarktanwendungen (2. Runder Tisch Supermarktkälte - UBA).

ChemKlimaschutzV, 2007. *Verordnung zum Schutz des Klimas vor Veränderungen durch den Eintrag bestimmter fluorierter Treibhausgase (Chemikalien-Klimaschutzverordnung – ChemKlimaschutzV) - Drucksache 16/7604*, Bundesanzeiger Verlagsgesellschaft.

ChemRRV-Schweiz, 2006. *Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung Schweiz (ChemRRV) - Kältemittel - Beilage II: Übersicht über die wichtigsten Kältemittel*, Schweizerische Eidgenossenschaft - Bundesamt für Umwelt BAFU.

Colbourne, Daniel, 2012. Outlook for hydrocarbons in air conditioning.

Cornehl, A.B., 1998. *Kraft-Wärme-Kopplung und der energiewirtschaftliche Ordnungsrahmen*. Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf.

Cox, N., Mazur, V. & Colbourne, D., 2009. Alternative low GWP MAC refrigerant blends. *Earthcare VDA Winter 2009 MAC meeting*.

DAIKIN, 2008. Daikin VRV - immer innovativer. *Daikin Presseinformation*.

DeStatis, S.B., 2010. Entgelte für die Trinkwasserversorgung privater Haushalte 2005 bis 2010. Available at: https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/Tabellen/Entgelteerhebung.html?nn=68748.

DIN-EN-13779, 2005. *DIN EN 13779 Lüftung von Nichtwohngebäuden - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen an Lüftungs- und Klimaanlagen*,

DIN-EN-378-1, 2011. *DIN EN 378-1 Kälteanlagen und Wärmepumpen - Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen - Teil 1: Grundlegende Anforderungen, Begriffe, Klassifikationen und Auswahlkriterien, Deutsche Fassung*, DIN Deutsches Institut für Normung e.V. - FNKä.

DIN-V-18599, 2007. *DIN V 18599-7: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 7: Endenergiebedarf von Raumlufttechnik- und Klimakältesystemen für den Nichtwohnungsbau*, Beuth Verlag Berlin.

DIN-V-18599-1, 2012. *DIN V 18599-1:2011-12 Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger*,

Dittmann, A. & Robbi, S., 2008. Das Spannungsfeld einer ökologischen Bewertung von KWK-Anlagen - 13. Dresdner Fernwärmekolloquium.

Dittmann, A., Sander, T. & Menzler, G., 2009. Die ökologische Bewertung von Wärme und Elektroenergie - ein Instrument zur Erhöhung der Akzeptanz der Kraft-Wärme-Kopplung. *VIK Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft - MItteilungen*, Juni.

DKV, Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e.V., 2002. *Statusbericht Nr. 22: Energiebedarf für die technische Erzeugung von Kälte in der Bundesrepublik Deutschland*,

EAW, Energieanlagenbau Westenfeld, 2010. Absorptionskälteanlage WEGRACAL SE 80 für den Betrieb mit Heizwasser - Teschnische Beschreibung - Stand Juni.

EC, Europäische Kommision, 2012. *Vorschlag für eine Verordnung des europäischen Parlaments und des Rates über flourierte Treibhausgase*, Europäische Kommission.

EC, Europäische Kommision, 2011. Energiefahrplan 2050.

ECEEE, European Council for an Energy Efficient Economy, 2011. *Working document on possible Commission Regulations implementing Directive 2009/125/EC with regard to professional refrigeration products - Part 4 - Refrigeration Process Chillers*,

Ecodesign, 2008. *Lot 10 Chapter 1: Preparatory study on the environmental performance of residential room conditioning appliances (airco and ventilation) – Task 2: Economic and Market analysis (Entwurf)*,

eCool, 2011. Die neue Baureihe DTI/DTS ECOOL.

EEG, 2009. *Erneuerbare-Energien-Gesetz*, Bundesministerium für Justiz. verfügbar unter: http://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2009/index.html.

Leipziger Institut für Energie GmbH, 2012. Entwicklung der Preise für Strom und Erdgas in Baden-Wurttemberg 2020.

EnEV, 2009. *EnEV 2009 - Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung*, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2009 Teil 1, Nr. 23, Bundesanzeiger Verlag. verfügbar unter: http://www.enev-online.org/enev_2009_volltext/index.htm.

Ernährung, L. und V. Bundesministerium für, 2009. *Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland 2009*, Wirtschaftsverlag NW Bremerhaven.

Erneuerbare Energien, A. für, 2012. Industrie profitiert vom strompreissendenden Effekt der Erneuerbaren Energien. *Renews Kompakt*.

Evonik_Industries, 2010. Energie aus Grubengas.

Fan, Y., Luo, L. & Souyri, B., 2007. Review of solar sorption refrigeration technologies: Development and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, pp.1758–1775.

Fankhauser, P., 2012. SUSI Energy Efficiency Fund - The Money is There: A Capital Market Perspective.

Fischedick, M. et al., 2002. *Instrumente zum Klimaschutz in einem liberalisierten Energiemarkt unter besonderer Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kopplung*, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH i.A. Umweltbundesamt.

Forster, P. & Ramaswamy, V., 2007. *4th Assessment Report - Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing*, IPCC (Intergovernmental panel of climate change). Available at: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/tssts-2-5.html.

Frauenhofer-UMSICHT, 2013. HEATLOOP - Entwicklung und Implementierung innovativer Abwärme-verbundsystme in industriellen Gewerbegebieten. verfügbar unter: http://www.heatloop.de/.

Fritsche, U.R. & Rausch, L., 2008. *Bestimmung spezifischer Treibhausgas-Emissionsfaktoren für Fernwärme*, Öko-Institut im Auftrag des Umweltbundesamtes.

Fritzsche, 2008. Energietechnik - Kondensation, Rückkühlung, Kraft-Wärme-Kopplung.

GEMIS, 2012. Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) - Version 4.7.1.

Germanus, J., 2011. *Ökoeffizientes Kältemittelazeotrop Ammoniak-Dimethylether*, ILK Dresden.

Gloor, R., 2010. Druckmaschine. Available at: http://www.energie.ch/druckmaschine.

Gluckman, R., Ashford, P. & Thurnham, T., 2012. *Phase Down of HFC Consumption in the EU – Assessment of Implications for the RAC Sector*, SKM Enviros i.A. von EPEE.

Haag, J., 2009. Neun Stationen in fünf Tagen, Exkursion Energietechnik - VW-Manufaktor Dresden. verfügbar unter: http://fh-offenburg.de/fhoportal/go.jsp?id=985.

Heinrich, C., 2004. *Modellierung und Simulation des Anlageverhaltens von solarthermisch beheizten einstufigen Absorptionskältemaschinen kleiner Leistung zur Klimakälteerzeugung*. Hochschule Zittau/Görlitz.

Henning, H.-M., 2004. Klimatisieren mit Sonne und Wärme. *BINE Info*, I/04, p.12.

Henning, H.-M., Urbaneck, T. & Morgenstern, A., 2009. *Kühlen und Klimatisieren mit Wärme*, BINE Informationsdienst.

Henrichs, A. ed., 2009. *Ökologische Betriebsbilanz 2007*, Mohn media Mohndruck GmbH, Gütersloh.

Höflich, B. et al., 2012. *Integration der erneuerbaren Energien in den deutschen/europäischen Strommarkt.*, Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena).

Hommel, O., 2006. Betriebsbesichtigung bei Firma Mohn media in Gütersloh - Hinter den Kulissen der größten Offset-Druckerei Europas. Available at: http://www.carlstahl.de/news/05_06.html.

Honeywell, 2012. Carbon taxes on HFCs. verfügbar unter: http://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=honeywell+%22carbon+taxes+hfcs%22+filetype%3Apdf&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CCYQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.honeywell-solstice-propellants.com%2FResourceCenter%2FDocuments%2FHoneywell-1234ze-HFO-carbon-tax-chart.pdf&ei=w4CaUJX8JYj0sgb5yoGgCw&usg=AFQjCNEn0raH8k8V1vSnHXhSLhC6cl2nwA.

hydrocarbons21.com, 2012a. Gree expands R290 portfolio with portable ACs and dehumidifiers. Available at: http://www.hydrocarbons21.com/news/view/3388.

hydrocarbons21.com, 2012b. Indian producer has sold 3,000 R290 AC units that meet 2016 efficiency standards. Available at: http://www.hydrocarbons21.com/news/view/3395.

Hydrocarbons21.com, 2012. New report on “Low GWP Alternatives to HFCs in Refrigeration” - the Danish case. *Hydrocarbons21.com*. verfügbar unter: http://www.hydrocarbons21.com/news/viewprintable/3317.

IGV, Interessenverband Grubengas e.V., 2012. Internetpräsenz des Verbandes. Available at: http://www.grubengas.de/german/verwertung_g.htm.

IUTA, Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V., 2002. Preisatlas - Ableitung von Kostenfunktionen für Komponenten der rationellen Energieerzeugung.

Jörß, W. & Klose, S., 2012. *Evaluierung des nationalen Teils der Klimaschutzinitiative des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit - Anhang A-6 zum Endbericht - Einzelprojektevaluierung: Impulsprogramm „Gewerbliche Kälteanlagen*, Öko-Institut e.V. (nicht veröffentlicht)

Jungnickel, H., Agsten, R. & Kraus, W.E., 1985. *Grundlagen der Kältetechnik* 2., stark überarbeitete., VEB Verlag Technik Berlin.

Kafsack, H., 2011. Klimaschutz verdoppelt Kosten für Haushalte. *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, 24.11. verfügbar unter: http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/wirtschaftspolitik/energiepreise-klimaschutz-verdoppelt-kosten-fuer-haushalte-11503911.html.

Kruse, H. & Wobst, E., 2004. TEWI-Betrachtung für Kälteanlagen mit HFKW und PFKW. *KI Kälte - Luft - Klimatechnik*, 4, pp.129–133.

KWKG, 2009. *Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz (2002 / Novelle 2009)*, Bundesministerium für Justiz. verfügbar unter: http://www.kwkg-novelle.de/kwk-gesetz_kwk-zuschlag.html.

LfU-Bayern, 2002. *CO2-MInderung durch rationelle Energienutzung in der Kunststoff-verarbeitenden Industrie*, Bayer. Landesamt für Umweltschutz.

LfU-Bayern, 2003. *Klimaschutz durch effiziente Energieverwendung in der Papierindustrie - Nutzung von Niedertemperaturabwärme*, Bayer. Landesamt für Umweltschutz.

Marcinichen, J.B., Thome, J.R. & Michel, B., 2010. Cooling of microprocessors with micro-evaporation: A novel two-phase cooling cycle. *Int. Journal of Refrigeration*, 33, pp.1264–1276.

Menerga, 2012. Persönliches Gespräch mit Mitarbeitern der Menerga GmbH, 19.04.2012.

menerga, 2010. Sorpsolair Sorptionsgestützte Klimatisierung für lufttechnische Anlagen Kälteerzeugung durch indirekte “adiabate” Verdunstungskühlung und sorptionsgestützte Luftentfeuchtung Typenreihe 72/73 Sorpsolair.

Merck, Kg., 2005. Weißes Gold - Ionische Flüssigkeiten bieten außergewöhnliche Perspektiven. *Einblicke in die Forschung bei Merck*, pp.16–18.

Meteonorm, 2009. *Meteonorm Version 6.1 - Software zur Erstellung von Klimadatensätzen weltweit - Meteotest, Schweiz, 2009*,

MIOBA, Mitteldeutscher Industrieofenbau, 2012. Innovative Maßnahmen zur Effizienzsteigerung von Industrieöfen. *ZIM - Netzerkprojekt: Abwärme Metallurgie, 2. Netzwerktreffen*.

Müller, M., Paatzsch, R. & Röllig, P., 2013. *Studie zu Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln*, ILK Dresden im Auftrag des Umweltbundesamts.

Nelles, J., Wurm, A. & Augenstein, E., 2011. Effiziente Werkzeugmaschine. *KKA Klima Kälte Aktuell*. verfügbar unter: http://www.kka-online.info/artikel/kka_Effiziente_Werkzeugmaschine_1179445.html.

Neumann, F. et al., 2011. Vergleich von zwei baugleichen Absorptionskältemaschinen mithilfe der charakteristischen Gleichung. *KI Kälte - Luft - Klimatechnik*, 4, pp.32–35.

Oraschewski, M., Scheiner, J. & Schuster, S.T., 2007. *Kälte-, Klima- und Kühltechnik (Planungshandbuch)*, WILO AG.

Pfeifroth, P. & Beer, M., 2009. *Primärenergetische Bewertung von Fernwärme aus KWK*, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V. (FfE) i.A. der AGFW.

Preuß, Gruntram, 2010. *Branchenbericht Deutscher Markt für Kältetechnik 2009*, VDMA - Allgmeine Lufttechnik, Forschungsrat Kältetechnik.

Preuß, Guntram, 2011. *Energiebedarf für Kältetechnik in Deutsch (Entwurf)*, VDMA - Fachverband Allgemeine Lufttechnik.

Probst, J., 2008. Energieeffiziente Kühlung von Bürogebäuden. In *CoolRegion - Energieeffiziente Gebäudekühlung - Münster*.

Quint-sdi-GmbH, 2010. Energierückgewinnung im Druckprozess.

Radgen, P. & Blaustein, E., 2001. *Compressed Air Systems in the European Union*, Frauenhofer ISI.

Radspieler, M. & Schweigler, Christian, 2010. Experimentelle Untersuchung der Ionischen Flüssigkeit EMIM S4 als Sorbens in einer einstufigen Kältemaschine mit adiabater Absorption. In *DKV Tagung - Magedeburg*.

Rhiemeier, J.-M., Harnisch, J., Ters, C., et al., 2008. *Vergleichende Bewertung der Klimarelevanz von Kälteanlagen und –geräten für den Supermarkt*, Ecofys GmbH, Hochschule Karlsruhe, Ökorechereche GmbH i.A. Umweltbundesamt.

Rhiemeier, J.-M., Harnisch, J. & Kauffeld, M., 2008. TEWI-Analysen und Betrachtung von Kosten und Unsicherheiten. *KI Kälte - Luft - Klimatechnik*, 10, pp.31–35.

Richter, L., 2008. Kälteerzeugung unter 0 °C mit einer Wasser/Lithiumbromid-Resorptionskältemaschine. *KI Kälte - Luft - Klimatechnik*, 3.

Richter, L., Safarik, M. & Kretzschmar, T., 2011. *Abschlussbericht zum FuE-Vorhaben: Untersuchung der Verwendung von Kristallisationsinhibitoren innerhalb von H2O- LiBr- Resorptionskälteanlagen zur Erzeugung von Kälte unter 0°C*, ILK Dresden.

Riesch, P. (Erfinder)-L.A.W.D. (Anmelder), 1999. Europäische Patentanmeldung: EP 1 010 954 A1 - Verfahren und Vorrichtung zum Abkühlen eines Gasstromes.

Robbi, S. & Sander, T., 2012. Primärenergiefaktor der Fernwärme - Berechnung nach AGFW FW 309-1.

SAENA, S.E.G., 2010. Abwärmeatlas Sachsen - Informationen zu Abwärmepotenzialen im Freistaat Sachsen. verfügbar unter: http://abwaermeatlas.saena.de/Die-interaktive-Karte.html.

Safarik, M., Richter, L. & Albring, P., 2010. Stand und Tendenzen der thermischen Kälteerzeugung im kleinen und mittleren Leistungsbereich. In *BHKS Almanach*.

Scholl, M. & Koch, H.-R., 2011. Daimler: Mehr Ef fizienz bei der Schaltschrank-Klimatisierung. *etz Eletrotechnik und Automation*, S1.

Schwarz et al., *Modelle für die Inventarerhebung von F-Gasen*, Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, FKZ 363 01 351, 2012.

Schweigler, Christian et al., 2003. Einheitliche Modellierung von Ab- und Adsorptionskälteanlagen. *KI Kälte - Luft - Klimatechnik*, 4, pp.166–173.

Seefeldt, F. et al., 2010. *Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen 2008*, Prognos AG Berlin, TU München Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, FrauenhoferGesellaschaft-ISI Karlsruhe.

Shecco, 2012. *Guide - Natural refrigerants market growth for europe*,

Siede, V., 2011. Ecodesign-Richtlinie für Kälte- und Klimasysteme. *3. Fachkongress Kälte- und Klimatechnik*. Available at: Ecodesign-Richtlinie für Kälte- und Klimasysteme.

Simmert, M., 2011. Absorptionskälte kommt. *KK - Die Kälte und Klimatechnik*, 6, p.3.

Storkenmaier, F., Schweigler, C. & Ziegler, F., 1999. Die charakteristische Gleichung von Sorptionskälteanlagen. In *Tagungsbericht der Deutschen Klima-Kälte-Tagung*. pp. 141–154.

Strogies, M. & Gniffke, P., 2013. *National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990 - 2011 – Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol 2013*, Umweltbundesamt.

Tebert, C. & Schmid-Bauer, E., 2006. *Betrieblicher Umweltschutz Baden-Württemberg - Druckindustrie und Papierverarbeitung*, Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden Württemberg.

Tejero, I., 2012. Services for a sustainable use of energy in industrial appliances and associated utilities. *EEIP Congress, Berlin*.

TRNSYS, 2004. *TRNSYS 17, a TRaNsient SYstem Simulation program, Volume 3, Standard Component Library Overview*,

Tuschinski, M., 2013. *EnEV 2014 - Was kommt wann? - Schritt für Schritt zur Novelle der Energieeinsparverordnung*, www.EnEV-online.de - Insutit für Energie-Effiziente Architektur mit

Internet Medien. verfügbar unter: http://service.enev-online.de/bestellen/energieausweis_energiepass_enev.htm.

Tzscheutschler, A., 2011. Der schnelle Weg zur Kälteleistung.

Umweltbundesamt, 2012a. Daten zur Umwelt - Umweltzustand Deutschland: Energie. verfügbar unter: http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2257.

Umweltbundesamt, 2012b. Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) - Daten zur Umwelt. verfügbar unter: http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2323.

VCI, 2011. *Chemiewirtschaft in Zahlen 2011* 53. ed., VCI - Verband der chemischen Industrien e.V.

VCI, 2012. *Chemiewirtschaft in Zahlen 2012* 54. ed., VCI - Verband der chemischen Industrien e.V.

VDI-2078, 2003. *VDI 2078: Berechnung der Kühllast klimatisierter Gebäude bei Raumkühlung über gekühlte Raumumschließungsflächen*, Verein Deutscher Ingenieure.

Weidner, G., 2008. Entwicklung und Anwendung von Absorptionkälteanlagen kleiner und mittlerer Leistung für KWKK und solare Kühlung. Vortrag auf dem ILK-Symposium Absorptionskälte und Solare Kühlung, Nürnberg.

Wiemken, E., Elias, A.R.P., Nienborg, B., et al., 2012. EvaSolk - Evaluierung der Chancen und Grenzen von solarer Kühlung im Vergleich zu Referenztechnologien - Analyse von solarthermischer und photovoltaisch gespeister Kälteerzeugung, AP 4 Vergleichsstudie - Modellansätze.

Wiemken, E., Elias, A.R.P. & Nienborg, B., 2012. EVASOLK - AP3 - Bewertung, Kostenfunktionen der Einzelkomponenten.

Wiemken, E., Safarik, M. & Riepl, M., 2012. EvaSolK - Evalulierung der Chancen und Grenzen von solarer Kühlung im Vergleich zu Referenztechnologien – Analyse von solarthermischer und photovoltaisch gespeister Kälteerzeugung. *BMU Statusworkshop*.

Wittig, S., Safarik, M. & Zachmeier, P., 2012. Monitoring und Effizienzermittlung - Vier Kompressionskältesysteme in unterschiedlichen Anwendungen. In *DKV-Jahrestagung 2012*.

WKO, W.Ö., 2007. *Verbote und Beschränkungen von teilfluorierten Kohlenwasserstoffen (HFKW)*,

Wobst, E. et al., 2003. *Aktuelle TEWI-Betrachtung von Kälteanlagen mit HFKW- und PFKW-Kältemitteln unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Rahmenbedingungen für verschiedene Anwendungsgebiete*, ILK Dresden und FKW Hannover i.A. Forschungsrat Kältetechnik.

Ziegler, Felix, 1998. Sorptionswärmepumpen: Beschreibung des Betriebsverhaltens durch eine charakteristische Gleichung. In R. Staudt, ed. *Technische Sorptionsprozesse, Fortschrittsbericte des VDI, Reihe 3, Verfahrenstechnik, Nr. 544*. VDI Verlag, Düsseldorf, pp. 259–279.

Zschernig, J. & Sander, T., 2007. *KWK-Strom - Was ist das?*, Institut für Energietechnik, TU Dresden.

11 Anlagen

11.1 Leckraten

Zu den im Abschnitt 7.2.2 zur TEWI-Berechnung herangezogenen Leckraten, werden hier weitere Werte aus der Literatur zum Vergleich vorgestellt.

11.1.1 Feldtests an Gewerbekälteanlagen

In einem vom Forschungsrat Kältetechnik vorgelegten Forschungsvorhaben wurden gewerbliche Kälteanlagen auf ihre Dichtheit bzw. auf Leckagen geprüft (Birndt 1999). Hierbei wurden im Jahr 1999 64 Gewerbekälteanlagen in den Bundesländern Hessen und Sachsen untersucht. Die Anlagen wiesen Füllmengen zwischen 0,7 und 360 kg auf. Alle Anlagen wurden in den Jahren 1990 bis 1999 installiert bzw. von FCKW- auf HFKW-Kältemittel umgestellt. Zur Lecksuche wurden Halogenlecksuchgeräte und selektive Gasdetektoren eingesetzt.

Tabelle 40 zeigt die gemittelten Leckraten, gestaffelt nach Füllmenge. In Abbildung 126 sind die Ergebnisse für die einzelnen Anlagen aufgetragen. Zu erkennen sind die erheblichen Schwankungen zwischen den Anlagen (logarithmischer Maßstab der Leckrate). So weisen ca. ein Drittel der Anlagen keine nachweisbaren Leckagen auf. Dem gegenüber stehen Einzelanlagen mit einem Totalverlust innerhalb eines Jahres. In Tabelle 42 sind die Einzelanlagen entsprechend dem FKT-Stufenplan bzw. der ChemKlimaSchutzV (siehe 11.1.2 FKT-Stufenplan) eingeordnet.

Abbildung 126: Leckraten der untersuchten Anlagen

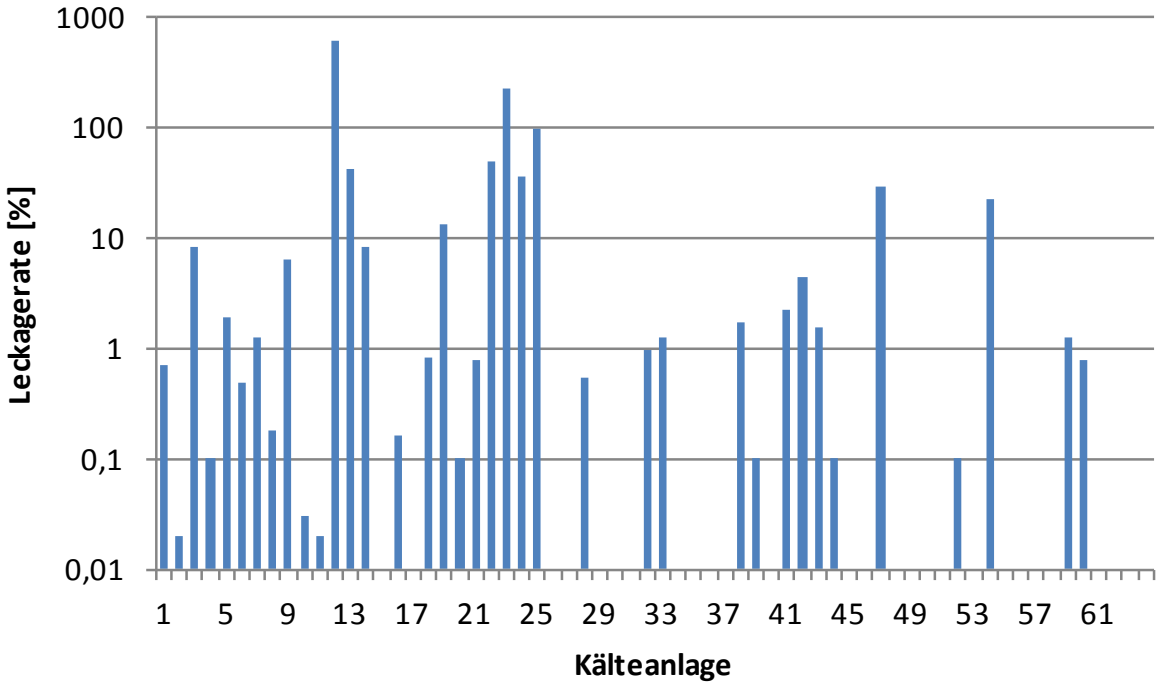


Tabelle 40: Mittlere Leckraten nach Kältemittelfüllmenge

Füllmenge	<10 kg	10...100kg	>100kg
Anzahl	25	18	11
mittlere Leckrate	18,7 %	38,5 %	1,3 %

Tabelle 41: Einordnung der Untersuchungsergebnisse aus (Birndt 1999) gemäß FKT-Stufenplan bzw. die ChemKlimaSchutzV

	erfüllt Stufe 1			erfüllt Stufe 2			erfüllt Stufe 3		
Füllmenge	<10kg	10...100kg	>100kg	<10kg	10...100kg	>100kg	<10kg	10...100kg	>100kg
ja	19	14	10	19	13	10	18	13	8
nein	6	4	1	6	5	1	7	5	3

11.1.2 FKT-Stufenplan

Begründet durch die o.g. Studie (Birndt 1999) schlug der Forschungsrat Kältetechnik einen zeitabhängigen Stufenplan für am Aufstellungsort aus Einzelkomponenten montierten Kälteanlagen (Montageanlagen) vor (Kruse & Wobst 2004). Für kältetechnische Werksanlagen (Kältesätze) gelten höhere Dichtheitsanforderungen. Die vorgeschlagenen Werte wurden in die Chemikalien-Klimaschutzverordnung (ChemKlimaschutzV 2007) durch den Deutschen Bundestag 2007 übernommen.

Tabelle 42: Zulässige Leckraten nach dem FKT-Stufenplan, umgesetzt in der ChemKlimaSchutzV (ChemKlimaschutzV 2007; Kruse & Wobst 2004).

Stufe	Zeitraum	Kältemittel-füllmenge [kg]	Leckrate [%]	
			Montageanlagen	Kältesätze
1	bis 06/2005	kleiner 10	10	
		10 ... 100	8	
		größer 100	4	
2	bis 06/2008	kleiner 10	6	
		10 ... 100	4	2
		größer 100	2	
3	bis 06/2018	kleiner 10	3	
		10 ... 100	2	
		größer 100	1	

11.2 Details zur Modellierung von Kältesystemen

11.2.1 Kältesysteme der Gebäudeklimatisierung

Tabelle 43: Ergänzende Angaben zur Modellierung des Multi-Split-VRF-Systems

Modellkomponente	Werte / Annahmen
• Außengerät	
Kältemittel	• R410a
Verflüssiger	• Minimale Temperaturdifferenz (Kühlluft und Kältemittel): 4 K • Unterkühlung des Kältemittels: 5 K • Ventilator: $P_{el,Nenn}$ = 625 W, variabler Volumenstrom
• Gebäude-Innengeräte	
Verdampfer / Konvektor	• Verdampfungstemperatur: 6 °C • Minimale Temperaturdifferenz zwischen Kältemittel und gekühlter Raumluft: 4 K • Angenommene Überhitzung des Kältemittels: 7 K • Möglichst realistische Luftzustandsänderung über den Konvektor nachgebildet durch gewichtete Mittelwertbildung aus den Ergebnissen zwei extremer Modelle - Modell 1: Luftzustandsänderung erfolgt entlang der Geraden zwischen Eintrittszustand und Taupunkt bei t_0 - Modell 2: nach ausschließlich sensibler Abkühlung bis zum Taupunkt erfährt die Luft anschließend eine Entfeuchtung entlang der Taupunktlinie - Wichtung der beiden Entfeuchtungsmodelle mit Hilfe des bewehrten TRNSYS-Konvektormodells bestimmt. • $\dot{V}_{Luft,Nenn}$ = 5000 m³/h, $P_{el,Nenn}$ = 410 W, konstanter Volumenstrom • Im Modell werden die Innengeräte zu einem Innengerät zusammengefasst (Ein-Zonen-Modell)
Kältemittel-leitungen	• Druck- und Temperaturänderungen aufgrund von Rohrleitungsverlusten werden nur in der Sauggasleitung berücksichtigt (Rohrleitungssänge: 50 m, Rohrdurchmesser: 33.7 mm), Verlust in Flüssigkeitsleitung vernachlässigbar
• Teillastverhalten	
Verdichter	• Konstante Verdichterleistung unterhalb 25% der Nennkälteleistung • Teillastverhalten mit vorhandenen Daten (DIN V 18599-7) validiert
Ventilator des Verflüssigers	• Volumenstrom des Verflüssiger-Ventilators direkt proportional zur Kälteleistung (jedoch unterhalb von 50% der Nennkälteleistung konstant) • Teillastverhalten mit vorhandenen Daten (DIN V 18599-7) validiert
• Regelung	
-	• Einstellen der Raumtemperatur auf den festgelegten Maximalwert durch Regelung des Kältemittel-Massenstroms (im Kühlfall)

Tabelle 44: Ergänzende Angaben zur Modellierung des Kaltwassersatzes (mit/ohne Speicher, Umluftkonvektoren/Kühldecke)

Modellkomponente	Werte / Annahmen
• Kaltwassererzeuger	
Kältemittel	• System mit Speicher: R410a • System ohne Speicher: R410a, R290, R134a, R717, R718, R1234yf
Verdichter	• Für R718 zweistufige Verdichtung mit interner Zwischenkühlung
Verflüssiger	• Für System mit Speicher minimale Kondensationstemperatur auf 15 °C festgelegt (schließt unrealistisch niedrige Verflüssigungstemperaturen aus, bei niedrigen Außentemperaturen während des Ladens des Speichers in der Nacht) • Ventilator: $P_{el,Nenn}$ = 625 W, variabler Volumenstrom
Verdampfer	• Soll-Vorlauftemperatur Kaltwasser ($t_{VL,KWS}$): 14 °C für Deckenkühlung, 10 °C für Umluftkonvektoren (ohne Speicher bzw. Speicher überbrücken), 6 °C (Speicher laden) • Rücklauftemperatur: variabel • Verdampfungstemperatur: $t_{VL,KWS}$ – 2 K • Überhitzung des Kältemittels: 0 K
• Kaltwasserspeicher	
Speicherbehälter	• Schichtenspeicher, Außenaufstellung • Volumen: Vorzugsvariante (aus Variantenvergleich) 7,5 m^3 • Verlust: 0,8 W/m^2K (Dämmstoff: ca. 50 mm Mineralwolle)
Hydraulikpumpe	• $\mu_{Wasser,Nenn}$ = 6000 kg/h, $P_{el,Nenn}$ = 150 W, Förderhöhe: 5 m (konstanter Volumenstrom)
• Gebäude-Innengeräte (Kaltwasserkreislauf)	
Konvektor	Luftzustandsänderung über TRNSYS-Konvektormodell bestimmt (Type 52b (TRNSYS 2004)) • $\varsigma_{Luft,Nenn}$ = 5000 m^3/h, $P_{el,Nenn}$ = 410 W, konstanter Volumenstrom • Im Modell werden die Innengeräte zu einem Innengerät zusammengefasst (Ein-Zonen-Modell)
Kälteträger-leitungen	• Druckverlust im Kaltwassernetz vernachlässigt (Einfluss auf Kühlwirkung gering, elektrischer Energieaufwand zur Überwindung des Druckverlustes mit Hydraulikpumpe berücksichtigt) • Wärmeeintrag aus Hydraulikpumpe über Pumpenwirkungsgrad berücksichtigt • „Kälteverlust" durch Rohrleitungen vernachlässigt (Annahme: Innenverlegung, gute Rohrleitungsdämmung)
Hydraulikpumpe	• $\mu_{Wasser,Nenn}$ = 6000 kg/h, $P_{el,Nenn}$ = 550 W, Förderhöhe: 20 m, variabler Volumenstrom (identisch für Systeme Deckenkühlung / Umluftkonvektoren)
• Teillastverhalten	
Verdichter	• Mehrstufig schaltbarer Verdichterverbund für gesamtes Bürogebäude, vereinfacht stufenlos zwischen 0 und 100 % der Nennleistung schaltbar • Teillastverhalten mit vorhandenen Daten (DINV18599-7) validiert
Ventilator des Verflüssigers	• Analog zu Multi-Split-VRF-System
• Regelung	
System ohne Speicher	• Einstellen der Raumtemperatur auf den festgelegten Maximalwert durch Regelung des Kältemittel- und Kälteträger-Massenstroms (im Kühlfall) • Bei Deckenkühlsystem wird die Vorlauftemperatur wenn nötig in Abhängigkeit der Taupunkttemperatur im Raum angepasst (Vermeiden von Tropfenbildung)

System mit Speicher	• Einstellen der Raumtemperatur analog zu System ohne Speicher (Regelung des Kälteträgermassestroms und Anpassung der Kälteerzeugerleistung bzw. Nutzung des Speichers) • Regelung mit 3 Modi - Modus 1: Speicher laden (bis auf 2 K unter Soll-Vorlauftemperatur kühlen, am frühen Morgen vor Beginn der Bürokühlung) - Modus 2: Speicher entladen (für bessere Speichernutzung Vorlauftemperatur von 4 K über Soll-Vorlauftemperatur zulässig) - Modus 3: Speicher überbrücken (z.B. wenn Speicher leer)

Tabelle 45: Ergänzende Angaben zur Modellierung der Raumlufttechnischen Anlage mit DEC-System

Modellkomponente	Werte / Annahmen
• Regeneratoreinheit	
Hydraulikpumpe für konzentrierte Salzlösung	$P_{el,Nenn}$ = 0,8 kW, für beide betrachteten Systemgrößen (SG1 / SG2), konstanter Volumenstrom (menerga 2010)
Regenerator	Spezifischer Leistungsbedarf für Regeneration: ca. 1,1 $kW_{thermisch}$/(kg Wasser/h), bei entsprechenden Heizwasserbedingungen (siehe BHKW)
Ventilator für Regenerationsluft	$P_{el,Nenn}$ = 0,8 kW (SG1) bzw. 1,0 kW (SG2), konstanter Volumenstrom (menerga 2010)
Hydraulikpumpe für verdünnte Salzlösung	$P_{el,Nenn}$ = 0,8 kW, für beide betrachteten Systemgrößen (SG1 / SG2), konstanter Volumenstrom (menerga 2010)
• Kühl- und Entfeuchtungseinheit	
Verdunstungs-kühlung	• Hydraulikpumpe: $P_{el,Nenn}$ = 0,6 kW, für beide betrachteten Systemgrößen (SG1 / SG2), konstanter Volumenstrom • Wasserbedarf: 8 – 10 kg/h je (1000 m^3_{Luft}/h), Annahme: 9 kg/h je (1000 m^3_{Luft}/h)
Absorber	• Wenn Entfeuchtungsbedarf, dann Entfeuchtung der Zuluft bis auf einen vorgegebenen Soll-Wert (Annahme: Entfeuchtungsleistung des Systems immer ausreichend) • Soll-Wert für Wassergehalt der Zuluft: 11,0 bzw. 9,0 g Wasser/kg Luft, je nach berechneter Variante
Zu-/Abluftventilatoren	$P_{el,Nenn}$ = 5,5 kW, $\dot{V}_{Luft,Nenn}$ = 6100 m^3/h (SG1) bzw. $P_{el,Nenn}$ = 7,2 kW, $\dot{V}_{Luft,Nenn}$ = 8300 m^3/h (SG2), variable Leistung (menerga 2010)
• Gebäude	
	• Keine Systemkomponenten im klimatisierten Raum zu berücksichtigen
• Teillastverhalten	
Regenerator	• Thermischer Leistungsbedarf abhängig von Entfeuchtungsbreite (s.o.) • Elektrischer Leistungsbedarf von Pumpen und Ventilator des Regenerators direkt proportional zur Entfeuchtungsleistung bei Annahme einer zyklischen Regeneration über Pufferbehälter
Zu-/Abluftventilatoren	• Volumenstrom je nach Kühlbedarf regelbar (unter Berücksichtigung des minimal erforderlichen Luftwechsels von 0,4)
Hydraulikpumpe für Verdunstungskühlung	• Wasservolumenstrom direkt proportional zur Kühlleistung
• Regelung	

-	• Einstellen der Raumtemperatur auf den festgelegten Maximalwert durch Regelung des Luftvolumenstrom der Zu- /Abluftventilatoren (im Kühlfall) • Folgende Betriebszustände (BZ) sind definiert: - BZ 0: Gerät vollständig deaktiviert (Nacht, Wochenende) - BZ 1: Gerät läuft mit Wärmerückgewinnung bei Raumtemp. unterhalb von 22 °C (bei steigenden Temp.) und 20 °C (bei fallenden Temperaturen), Luftwechsel 0,4, Rückwärmzahl 0,8 - BZ 2: Freies Kühlen ab Raumtemp. von 22 °C (bei steigenden Temp.) bis zur max. zulässigen Raumtemp., bei fallenden Temp. bis auf 20 °C, Luftwechsel 0,4 - BZ 3: Indirekte Verdunstungskühlung max. zulässiger Temperatur (bei steigenden Temp.) bis runter auf 22 °C (bei fallenden Temp.), Luftvolumenstrom von 448 m3/h (Luftwechsel = 0,4) bis Nennvolumenstrom des Zu-/Abluftventilators → Regelung durch PID über Raumtemperatur - BZ 4: wie 3, nur mit Entfeuchtung bei Feuchteüberschreitung im Büro von 11,5 g Wasser/kg Luft, Trocknen der Zuluft bis auf 11,0 g Wasser/kg Luft (zweite Parametrisierungsvariante: 9,5 g Wasser/kg Luft, auf 9,0 g Wasser/kg Luft)
• BHKW	
	• Vorlauf- / Rücklauftemperaturen des Heizwassers für Regenerator wird als passend zu dem berücksichtigten Leistungsbedarf für die Regeneration angenommen (70/60 °C)
• Bilanzierung	
Energiebedarf	• Thermischer Energiebedarf des Regenerators und Wasserbedarf der adiabaten Verdunstungskühlung wird ebenfalls bilanziert

11.2.2 Kältesysteme der Industriekälteversorgung

Tabelle 46: Ergänzende Angaben zur Modellierung des Kaltwassersatzes für den Bereich Industriekälteversorgung

Modellkomponente	Werte / Annahmen
• Kaltwassererzeuger	
Kältemittel	• R410a, R290, R134a, R717, R1234yf
Verdichter	• Für R718 zweistufige Verdichtung mit interner Zwischenkühlung
Verflüssiger	• Minimale Temperaturdifferenz zwischen Kühlluft und Kältemittel: 4 K • Für System mit Speicher minimale Kondensationstemperatur auf 5 °C (für R718) / 15 °C (für andere Kältemittel) begrenzt • Ventilator: $P_{el,Nenn}$ = 12,5 kW, variable Leistung
Verdampfer	• Verdampfungstemperatur: -1 °C • Überhitzung des Kältemittels: 0 K
• Regelung	
-	• Anpassung der Verdichter- und Ventilatorleistung an Außentemperatur zum Erzeugen einer konstanten Kälteleistung

Tabelle 47: Ergänzende Angaben zur Modellierung der Absorptionskälteanlage für den Bereich Industriekälteversorgung

Modellkomponente	Werte / Annahmen
• Rückkühlwerk	
Ventilator	Ventilator: $P_{el,Nenn}$ = 97,6 kW, $\dot{V}_{Luft,Nenn}$ = 200 m³/s, variabler Volumenstrom, abgeleitet aus (AIA 2008)
Adiabate Vorkühlung	• Bei Außentemperaturen über 16 °C

Hydraulikpumpe	• Pel,Nenn = 0.25 kW, Förderhöhe: 20 m, konstanter Volumenstrom
• Absorptionskältemaschine	
Stoffpaar	• Ammoniak/Wasser
Kennwerte	• Wärmeverhältnis: 0,58 • Treibende Temperaturdifferenz: 11.8 K • (Datenblätter, Erfahrungswerte)
Temperaturen / Volumenströme	• Heizwasser: Temperaturen: 90/83 °C, Volumenstr.: 105,5m³/h • Kühlwasser: Temperaturen: 34/39 °C, Volumenstr.: 234,7m³/h • Kaltwasser: Temperaturen: 1.5/6.5 °C, Volumenstr.: 86m³/h • (Kaltwassertemperatur 0,5 K niedriger als Soll-Vorlauftemperatur zum Kälteverbraucher (+2°C) zum Kompensieren leichter Schwankungen)
Hydraulikpumpen	• Angenommene Leistung bei konstanten Volumenströmen: - Heizwasserpumpe: $P_{el,Nenn}$ = 4,8 kW, Förderhöhe: 10 m - Kühlwasserpumpe: $P_{el,Nenn}$ = 10,7 kW, Förderhöhe: 10 m - Kaltwasserpumpe: $P_{el,Nenn}$ = 2,0 kW, Förderhöhe: 2 m
Rohrleitungen	• Elektrischer Energieaufwand zur Überwindung des Druckverlustes mit Hydraulikpumpe berücksichtigt • Wärmeeintrag aus Hydraulikpumpe über Pumpenwirkungsgrad berücksichtigt • „Kälteverlust" durch Rohrleitungen vernachlässigt (Annahme: gute Rohrleitungsdämmung, kurze Leitungen)
• Pufferspeicher	
-	• Dient zum Ausgleich von Unstetigkeiten in der Regelung (z.B. bei Zuschaltung der adiabaten Vorkühlung am Rückkühlwerk) • Volumen: 2 m² • Kälteverlust vernachlässigt (da < 0.05 % der Kälteleistung)
• Regelung	
-	• 2 Regelungsvarianten: - Variante 1: konstante Kühlwassertemperatur durch Regelung des Volumenstroms des Rückkühl-Ventilators in Abhängigkeit der Außentemperatur → konstante Kaltwassertemperatur - Variante 2: variable Kühlwassertempertur in Abhängigkeit der Außentempertur (Minimal zulässige Kühlwassertemperatur 6.5°C), Unterhalb einer Außentemperatur von -2.5°C → Freie Kühlung des Kaltwassers über Rückkühlwerk • Leichte Abweichungen der Soll-Temperatur durch Pufferspeicher und geregelte Rücklaufbeimischung (zwischen Speicher und Kälteverbraucher) ausgeglichen
• Bilanzierung	
-	• Neben der Bilanzierung der Elektroenergie auch Bilanzierung des thermischen Energieverbrauchs und des Wasserverbrauchs

Tabelle 48: Ergänzende Angaben zur Modellierung des Direktverdampfungssytems für den Bereich Industriekälteversorgung

Modellkomponente	Werte / Annahmen
• Kaltwassererzeuger	
Kältemittel	• R723, R134a
Verflüssiger	• Minimale Kondensationstemperatur auf 15 °C begrenzt
Verdampfer	• Verdampfungstemperatur: 2 °C • Überhitzung des Kältemittels: 0 K
• Regelung	
-	• Analog zu Kaltwassersatz für Industriekälte

Tabelle 49 : Aufstellung von Investitions-, Instandhaltungs-, und Entsorgungskosten der betrachteten Systeme im Bereich der Gebäudeklimatisierung (für VRF- und KWS-System, Bürofläche 400 m², Nennkälteleistung der Systeme 25 kW (außer DEC-System 57,9 kW), inkl. MWSt.)

	Einheit	VRF	Quelle / Bemerkung	KWS			Quelle / Bemerkung
				Konvekt.	Konvektor + Speich.	Kühldecke	
Investitionskosten							
Außeneinheit	EUR/kW(Kälte)	316	Kostenfunktion aus [Wiemken], Einzelangebot	240	240	240	Kostenfunktion aus [Wiemken]
Inneneinheit / Kühldecke	EUR/m² (Geb)	31	Einzelangebot	31	31	87	Einzelangebot, [dietrich2011]
Kältenetz	EUR/m²(Geb)	29	Einzelangebot	29	29	29	analog VRF
Kollektoren	EUR/m²(Koll)	-		-	-	-	
Speicher	EUR/m²	-		-	830	-	Kostenfunktion aus [Wiemken]
Rückkühlwerk	EUR/kW(RuKu)	-	in Außengerät intigriert	-	-	-	in Außengerät intigriert
Installation Gerät	EUR/m²(Geb)	2,35	Einzelangebot	2,35	2,35	2,35	10 % Gerätepreis
Installation Netz	EUR/m²(Geb)	21	Einzelangebot	21	21	21	analog VRF
Investition gesamt	EUR / m²	40362	s.o. und [Kunicic2005]	37655	43878	60981	s.o. und [Kunicic2005]
Lebensdauer	A	15,00	[VDI 2067, DIN EN 13779:2004, DIN EN 15459]	15	15	15	[VDI 2067, DIN EN 13779:2004, DIN EN 15459]
Marktzins (ohne Inflation)	%	6,00	Internet Recherche	6	6	6	Internet Recherche
Annuitäten	**EUR / a**	**4156**	nach [VDI 2067]	**3877**	**4518**	**6279**	nach [VDI 2067]
Jährliche Instandhaltungskosten							
Bezogen auf Investition	% / a	4,00	nach [DIN EN 15459], Einzelangeb.	4,00	4,00	-	nach [DIN EN 15459], Einzelangeb.
Absoluter Betrag	**EUR / a**	**1614**		**1506**	**1755**	**1506**	
Entsorgungskosten							
Bezogen auf Investition	%	2	Gespräch mit Anlagenbauer	-	-	-	
Absolut / Jahr	**EUR / a**	**54**		**54**	**54**	**54**	analog VRF

Tabelle 50: Aufstellung von Investitions-, Instandhaltungs-, und Entsorgungskosten der betrachteten Systeme im Bereich der Gebäudeklimatisierung (für AKM- und DEC-System, Bürofläche 400 m², Nennkälteleistung der Systeme 25 kW (außer DEC-System 57,9 kW), inkl. MWSt.)

	Einheit	**AKM FW (A_Kol = 90 m²) Kühldecke**	Quelle / Bemerkung	**DEC**	Quelle / Bemerkung
Investitionskosten					
Außeneinheit	EUR/kW(Kälte)	525	Kostenfunktion aus [Wiemken]	1314	Einzelangebot
Inneneinheit/Kühldecke	EUR/m²(Geb)	87	Einzelangebot, [dietrich2011]	-	in Außeneinh. enth.
Kältenetz	EUR/m²(Geb)	29	analog VRF	62	Abschätz. Anlagenbauer
Kollektoren	EUR/m²(Koll)	229		-	
Speicher	EUR/m²	947	Kostenfunktion aus [Wiemken]	-	
Rückkühlwerk	EUR/kW(RuKu)	42	Kostenfunktion aus [Wiemken]	-	
Installation Gerät	EUR/m² (Geb)	3,3	10 % Gerätepreis	19,0	10 % Gerätepreis
Installation Netz	EUR/m²(Geb)	21	analog VRF	33,3	35 % Kältenetzkosten
Investition gesamt	EUR / m✣	95752		108415	
Lebensdauer	a	18	[VDI 2067]	15	[VDI 2067]
Marktzins (ohne Inflation)	%	6	Internet Recherche	6	Internet Recherche
Annuitäten	**EUR / a**	**8843**	nach [VDI 2067]	**11163**	nach [VDI 2067]
Jährliche Instandhaltungskosten					
Bezogen auf Investition	% / a	-	absolut wie VRF	-	absolut wie VRF
Absoluter Betrag	**EUR / a**	**1614**		**1614**	
Entsorgungskosten					
Bezogen auf Investition	%	-		-	
Absolut / Jahr	**EUR / a**	**54**	analog VRF	**54**	analog VRF

Tabelle 51: Aufstellung von Investitions-, Instandhaltungs- und Entsorgungskosten der betrachteten Systeme im Industriekältesektor (Nennkälteleistung der Systeme 500 kW inkl. MWSt.)

	Einheit	**KWS**	Quelle / Bemerkung	**Direkt-verdampfer**	Quelle / Bemerkung	**AKM**	Quelle / Bemerkung
Investitionskosten							
Gerätekosten	EUR/kW(Kälte)	195	inkl. Rückkühl., Kostenfunktion aus [Wiemken]	234	inkl. Rückkühler, 20 % teurer als KWS analog zu Recherche bei Bürokälte	530	Kostenfunktion aus [Wiemken]
Speicher	EUR/m²	-		-		1546	Kostenfunktion aus [Wiemken]
Rückkühlwerk	EUR/kW	-		-		177 / 26	Einzelangebote (hybr. Kühlturm / offener Nasskühlturm)
Installation	EUR/kW	20	10 % Investitionskosten (analog DEC)	23	analog KWS	50	10 % Investitionskosten (analog DEC)
Investition gesamt	EUR / m²	129853		155824		541669	
Lebensdauer	a	15	[VDI 2067, DIN EN 13779:2004, DIN EN 15459]	15	analog KWS	18	[VDI 2067, DIN EN 13779:2004, DIN EN 15459]
Marktzins (ohne Inflation)	%	6	Internet Recherche	6	Internet Recherche	6,00	Internet Recherche
Annuitäten	**EUR / a**	**13370**	nach [VDI 2067]	**16044**	nach [VDI 2067]	**50027**	nach [VDI 2067]
Jährliche Instandhaltungskosten							
Bezogen auf Investition	% / a	4	nach [DIN EN 15459], Einzelangebote	4	analog KWS	-	absolut wie VRF
Absoluter Betrag	**EUR / a**	**5194**		**6233**		**5194**	
Entsorgungskosten							
Bezogen auf Investition	%	2	Gespräch mit Anlagenbauer	2	Gespräch mit Anlagenbauer	2	Gespräch mit Anlagenbauer
Absolut / Jahr	**EUR / a**	**173**		**208**		**602**	