Diplomarbeit

Ökologischer Vergleich ausgewählter aktueller Kältemittel im Anwendungsfall einer Tiefkühlanlage

Vorgelegt am:	**30.08.2022**
Von:	**Kasiske, Olaf** **Bisamkiez 3** **14478 Potsdam**
Studiengang:	**Versorgungs- und Umwelttechnik**
Studienrichtung:	**Kälte und Klimatechnik**
Seminargruppe:	**4GA19/1**
Matrikelnummer:	**S4003755**
Praxispartner:	**ST Gebäudetechnik GmbH** **Horstweg 53a** **14482 Potsdam**
Gutachter:	**Dr.-Ing. Stephan Lehr (Staatliche Studienakademie Glauchau)** **Dipl. -Ing. (BA) Markus Herzog (ST Gebäudetechnik)** **Prof. Dr. Jörg Scheibe (Staatliche Studienakademie Glauchau)**

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis II

Sperrvermerk III

Abkürzungsverzeichnis IV

Abbildungsverzeichnis VI

Tabellenverzeichnis VII

Einleitung 1

1. Aktuelle Kältemittelsituation 2

1.1. Forderung der Neuen F Gase Verordnung 2

1.2. Aktuelle Kältemittel 3

2. Thermodynamische Gegenüberstellung verschiedener Kältemittel 4

2.1. Mögliche Kältemittel 4

2.2. Auswahl verschiedener Kältemittel 5

2.3. Maximale Füllmenge 6

2.4. Thermodynamische Eigenschaften 10

3. Berechnungen zur energetischen Effizienz für den Anwendungsfall einer Tiefkühlanlage 13

3.1. Einstufiger Prozess 16

3.2. Zweistufiger Prozess 21

3.3. Kaskadenschaltung 28

3.4. Zusammenfassung zur energetischen Effizienz 38

4. Vergleich hinsichtlich ökologischer Faktoren und Auswertung 42

4.1. Einstufiger Prozess 45

4.2. Zweistufiger Prozess 47

4.3. Kaskade 49

5. Auswertung 51

Ehrenwörtliche Erklärung 53

Quellenverzeichnis 54

Anhangsverzeichnis 56

Sperrvermerk

Die vorliegende Diplomarbeit mit dem Titel

„*Ökologischer Vergleich ausgewählter aktueller Kältemittel im Anwendungsfall einer Tiefkühlanlage*“

enthält vertrauliche Daten des Unternehmens ST Gebäudetechnik. Eine Veröffentlichung und Vervielfältigung der Diplomarbeit ist - auch in Auszügen - nicht gestattet.
Eine Einsichtnahme der Arbeit durch Unbefugte bedarf einer ausdrücklichen Genehmigung des Verfassers und des Unternehmens ST Gebäudetechnik GmbH.

Abkürzungsverzeichnis

ODP Wert	- Ozon Destruction Potencial (Ozonabbaupotenzial)
GWP Wert	- Global Warming Potencial (Treibhauspotenzial)
LFL Wert	- Lower Flammability Limit (untere Explosionsgenze)
TEWI	- Total Equivalent Warming Impact
SL	- Saugleitung
FL	- Flüssigkeitsleitung
DL	- Druckleitung
VFL	- Verflüssiger
VDA	- Verdampfer
VDI	- Verdichter
COP	- Coeffizient of Performance
IWÜ	- innerer Wärmeübertrager
KM	- Kältemittel
ZK	- Zwischenkühler
t_c	- Verflüssigungstemperatur
p_c	- Verflüssigungsdruck
t_0	- Verdampfungstemperatur
p_0	- Verdampfungsdruck
t_{0h}	- Sauggastemperatur Verdampferausgang
Δt_{0h}	- Überhitzungstemperaturdifferenz
t_{cu}	- Flüssigkeitstemperatur Verflüssigerausgang
Δt_{cu}	- Unterkühlungstemperaturdifferenz
t_m	- Mitteltemperatur
p_m	- Mitteldruck
p_{Amb}	- Normdruck 101325 Pa
p_{abs}	- absoluter Druck
t_{Krit}	- Kritische Temperatur
q_v	- volumetrische Kälteleistung kJ/m^3
h	- spezifische Enthalpie in kJ/kg

t_{V1} - Verdichtereintrittstemperatur

t_{V2} - Verdichteraustrittstemperatur

Q_0 - Kälteleistung in kW

P_{el} - elektrische Leistung in kW

q_0 - spezifische Kälteleistung in kJ/kg

w_{el} - spezifische reale Verdichterleistung in kJ/kg

w_{is} - spezifische isentrope Verdichterleistung in kJ/kg

$\dot{m}$ - Massenstrom in kg/s

s - spezifische Entropie in J/kgK

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bedeutung der „Neuen-F-Gase-Verordnung“ 2
Abbildung 2: Berechnung der maximalen Füllmenge brennbarer Kältemittel 6
Abbildung 3: Kategorien des Zugangsbereiches 7
Abbildung 4: Anlagenklassifikationen 7
Abbildung 5: Variabler Hochdruck von CO2 im transkritischen Prozess 14
Abbildung 6: R&I-Fließbild einstufiger Prozess..... 16
Abbildung 7: Ergebnisse zu den Berechnungen des einstufigen Prozesses bei 45 °C Verflüssigung..... 17
Abbildung 8: Ergebnisse zu den Berechnungen des einstufigen Prozesses bei 35 °C Verflüssigung..... 18
Abbildung 9 : COP Werte des einstufigen Berechnungsmodelles bei verschiedenen Verflüssigungstemperaturen..... 19
Abbildung 10: RI Fließbild zweistufiger Prozess..... 21
Abbildung 11: zweistufiger Prozess im Log P-H Diagramm..... 22
Abbildung 12: Ergebnisse zu den Berechnungen des zweistufigen Prozesses bei 45 °C Verflüssigung..... 23
Abbildung 13: Verdichtung bei verschiedenen Ansaugentropien..... 23
Abbildung 14: COP Werte im Vergleich..... 24
Abbildung 15: Verdichtungsendtemperaturen im Vergleich..... 26
Abbildung 16: COP-Werte bei zweistufiger Verdichtung mit und ohne Zwischenkühlung 27
Abbildung 17: Log P-H Diagramm Kaskade 28
Abbildung 18: RI Fließbild Kaskade..... 28
Abbildung 19: Energieflussdiagramm Kaskade 30
Abbildung 20: COP Werte Niedertemperaturkreislauf 31
Abbildung 21: Gesamt-COP-Werte Kaskadenberechnung 1.Fall und 2. Fall 34
Abbildung 22: Heißgastemperaturen der Kaskade im 1. Fall..... 35
Abbildung 23: COP Werte der Kaskade mit Zwischenkühlung, für den 1. und den 2. Fall..... 36
Abbildung 24: Füllmengenabhängige Veränderung der TEWI Werte des einstufigen Kreislaufes..... 46
Abbildung 25: Füllmengenabhängige Veränderung der TEWI Werte des zweistufigen Kreislaufes..... 48
Abbildung 26: Füllmengenabhängige Veränderung der TEWI Werte der Kaskade .. 50

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.2.1: Geeignete Tiefkühlkältemittel

Tabelle 2.3.1: maximale Kältemittelfüllmenge verschiedener Kältemittel

Tabelle 2.3.2: Leistungsabhängige Füllmengen

Tabelle 2.4.1: Thermodynamische Eigenschaften der Kältemittel

Tabelle 2.4.1: Thermodynamische Eigenschaften der Kältemittel

Tabelle 3.0.1: Tabelle 3.0.1: Idealer Hochdruck von R744

Tabelle 3.1.1: energetische Effiziente Kältemittel den Vergleichskältemitteln R404A und 452A

Tabelle 3.1.2: Kältemittel im Vergleich

Tabelle 3.3.1: Mitteldrücke der Niedertemperaturstufe und zugehörige Temperaturen

Tabelle 3.3.2: Größenordnungen von Wärmeübergangskoeffizienten

Tabelle 3.3.3: Kältemittel mit der höchsten energetischen Effizienz

Tabelle 3.3.4: Veränderung der COP-Werte der zweiten Stufe bei Einsatz eines inneren Wärmeübertragers

Tabelle 3.3.5: prozentuale Änderung der COP-Werte bei Absenkung der Temperaturdifferenz des Kaskadenwärmeübertragers von 5 auf 2 K

Tabelle 3.4.1: prozentualer Vergleich der COP-Werte des ein- und zweistufigen Prozesses bei verschiedenen Verflüssigungstemperaturen, Bezugs- COP-Werte = R404A

Tabelle 3.4.2: prozentualer Vergleich der gesamt COP Werte der Kaskade mit Zwischenkühlung im 1. Fall

Tabelle 3.4.3: COP Werte der R290/R744 Kaskade im Vergleich

Tabelle 3.4.4: COP Werte bei einer Verflüssigung von 35 °C aus Verschiedenen Berechnungsmodellen im Vergleich

Tabelle 4.1.1: ökologische Effizienz des einstufigen Kältekreislaufes

Tabelle 4.2.1: ökologische Effizienz des zweistufigen Kältekreislaufes

Tabelle 4.3.1: ökologische Effizienz der Kaskade

Einleitung

Im Zuge der „Neuen F-Gase Verordnung“ findet eine Umstrukturierung der aktuellen Marktsituation hinsichtlich der verschiedenen Kältemittel statt. Einige Kältemittel dürfen nicht mehr eingesetzt werden bei anderen wird der Marktpreis ansteigen bedingt durch die Verknappung im Zuge des Phase Down. Das Unternehmen ST Gebäudetechnik stand in den letzten Jahren wiederholt vor der Aufgabe ein geeignetes und verfügbares Tiefkühlkältemittel im Bereich der gewerblichen Kleinkälte zu finden. Der typische Anwendungsfall einer Tiefkühlzelle, die von einem externen Kälteaggregat versorgt wird, wäre der welchen den ST Gebäudetechnik gelegentlich anbietet. In der Vergangenheit wurde dazu das vielseitig verwendete R 404A als Kältemittel genutzt. Nach dem Verbot dieses Kältemittels für Neuanlagen musste eine Alternative gefunden werden. Der Einsatz des Ersatzkältemittels R449A brachte einige Probleme mit sich, sodass sich dieses Medium nicht als Alternative behaupten konnte. Daraufhin wurde im zweiten Zuge das Kältemittel R452A eingesetzt, welches rein technisch keine Probleme verursachte. Da beide Kältemittel einen verhältnismäßig hohen GWP-Wert aufweisen (R449A = 1397, R452A= 2140) ist die Zukunft dieser Arbeitsstoffe jedoch ungewiss. Ziel dieser Arbeit ist es einige der aktuellen Kältemittel im Anwendungsfall einer Tiefkühlanlage ökologisch miteinander zu vergleichen, um eine sinnvolle und zukunftssichere Alternative für das Kältemittel R404A zu ermitteln. In dieser Diplomarbeit werden dabei verschiedene Anwendungsfälle hinsichtlich ihrer ökologischen Effizienz untersucht.

1. Aktuelle Kältemittelsituation

1.1. Forderung der Neuen F Gase Verordnung

Die „Neue F-Gase-Verordnung“ (EU Nr. 517/2014[1]) sieht ein Verbot für Kältemittel mit einem GWP über 2500 sowie diverse Auflagen beim Inverkehrbringen neuer Kälteanlagen vor.

Betroffene Geräte (Auszug Anhang III F-Gase-Verordnung)	Verboten ab
Haushaltskühl- und Haushaltsgefriergeräte mit HFKW mit einem GWP von 150 oder mehr	01. Januar 2015
Kühlgeräte und Gefriergeräte für die gewerbliche Verwendung (hermetisch geschlossene Einrichtungen), die HFKW mit einem GWP von 2.500 oder mehr enthalten	01. Januar 2020
Kühlgeräte und Gefriergeräte für die gewerbliche Verwendung (hermetisch geschlossene Einrichtungen), die HFKW mit einem GWP von 150 oder mehr enthalten	01. Januar 2022
Ortsfeste Kälteanlagen, die HFKW mit einem GWP von 2 500 oder mehr enthalten oder zu ihrem Funktionieren benötigen, außer Einrichtungen, die für Anwendungen zur Kühlung von Produkten auf unter – 50 °C bestimmt sind	01. Januar 2020
Mehrteilige zentralisierte Kälteanlagen für die gewerbliche Verwendung mit einer Nennleistung von 40 kW oder mehr, die fluorierte Treibhausgase mit einem GWP von 150 oder mehr enthalten oder zu ihrem Funktionieren benötigen, außer im primären Kältemittelkreislauf in Kaskadensystemen, in dem fluorierte Treibhausgase mit einem GWP von weniger als 1 500 verwendet werden dürfen	01. Januar 2022
Bewegliche Raumklimageräte (hermetisch geschlossene Systeme, die der Endnutzer von einem Raum in einen anderen bringen kann), die HFKW mit einem GWP von 150 oder mehr enthalten	01. Januar 2020
Mono-Splitklimageräte mit weniger als 3 kg fluorierter Treibhausgase, die fluorierte Treibhausgase mit einem GWP von 750 oder mehr enthalten oder zu ihrem Funktionieren benötigen	01. Januar 2025

Abbildung 1: Bedeutung der „Neuen-F-Gase-Verordnung“

[1] Neue F-Gase Verordnung

Nach den Auflagen der „Neuen-F-Gase-Verordnung“ (Abbildung 1.1) könnten Tiefkühlanlagen nach wie vor mit einem Kältemittel bis zu einem GWP < 2500 betrieben werden, sofern das System kleiner als 40 kW Nennleistung ist oder es sich um ein einteiliges Gerät handelt.
Da in dieser Verordnung auch ein Phase-down Vorgesehen ist, werden Kältemittel mit einem hohen GWP-Wert eine entsprechende Preissteigerung erfahren. Der Phase-down sieht dabei eine Senkung des CO_2 Ausstoßes bis 2030 auf 21% vor. Als Referenzwert gelten die durchschnittlich in den Verkehr gebrachten Mengen von 2009-2012. Das jährliche Kontingent an F-Gasen der Großhändler wird über eine Quote begrenzt, welche schrittweise reduziert wird. Beim Verkauf von 1 kg R 410A mit einem GWP von 2088 könnte der Hersteller alternativ auch 2088 kg des Kältemittels R744 (GWP=1) verkaufen, bei gleicher Quote. Durch die drastische Auswirkung der hohen GWP-Werte auf das Verkaufskontingent der Hersteller wird der Preis der betroffenen Kältemittel ansteigen.

1.2. Aktuelle Kältemittel

Durch die Forderungen der „Neuen-F-Gase-Verordnung“ werden einige Kältemittel künstlich verknappt, andere werden oder bleiben verboten. Als aktuelle Kältemittel können demnach alle Kältemittel angesehen werden, die keinem Verbot unterliegen. Weiterhin müssen die Arbeitsstoffe verfügbar sein und es muss ein funktionierendes Anlagenkonzept vorhanden sein sowie ein einsetzbarer Schmierstoff.

2. Thermodynamische Gegenüberstellung verschiedener Kältemittel

2.1. Mögliche Kältemittel

Nach dem TLMV (Verordnung über tiefgefrorene Lebensmittel)[2] ist bei tiefgefrorenen Lebensmitteln eine Temperatur von mindestens – 18 °C erforderlich. In den folgenden Berechnungen wird eine Raumtemperatur von -20 °C zugrunde gelegt, da zwischen Ein- und Ausschaltpunkt des Innengerätes eine Hysterese von zwei Kelvin angesetzt wird. Im kleinen Leistungsbereich der Tiefkühlanwendung werden unter Anderem thermostatische Einspritzventile eingesetzt mit einer Sauggasüberhitzung von bis zu 10 K. Die dafür erforderliche Verdampfungstemperatur wurde mit Hilfe der Güntner Onlineauslegungssoftware[3] bestimmt. Die Bedingungen dieser Auslegung lauteten:

Verflüssigungstemperatur	=45°C
Flüssigkeitunterkühlung	= 2 K
Kühlraumtemperatur	= -20°C

In den Auslegungsblättern wurde eine Luftansaugtemperatur des Verdampfers von -20 °C einkalkuliert. Diese Bedingungen stellen den Extremfall im Sommer dar. Die Ergebnisse dieser Auslegungen zeigen, dass Verdampfungstemperaturen von -31 °C unter diesen Bedingungen mit R404A möglich sind und es verfügbare Wärmeübertrager gibt. Bei einer alternativen Auslegung mit derselben Software wurde eine Verdampfungstemperatur von -27 °C bei einer Sauggasüberhitzung von 6 K für verschiedene Kältemittel, bei ansonsten gleichen Bedingungen, durchgeführt. Die Datenblätter dieser Auslegung (Anhang 1) zeigten ebenfalls, dass diese Bedingungen durchführbar sind. Auf Grundlage dieser Auslegungsdatenblätter wird in den weiteren Berechnungen mit einer Temperaturdifferenz von 1 K zwischen Luftansaugtemperatur und Austrittstemperatur des Kältemittels gerechnet.

Unter Beachtung des Druckabfalls der Rohrleitung, der einen Wert von 2 K nicht überschreiten sollte[4], ergibt sich eine geringere Verdampfungstemperatur am Verdichter. Bei der Betrachtung des extremen Falls liegt diese bei -33 °C. Mit einem

[2] TLMV
[3] Güntner Onlinesoftware
[4] Kältetechnik, Maurer S 546

Sicherheitszuschlag von weiteren 2 K ergibt sich eine Verdampfungstemperatur von -35°C am Verdichter, welche mit dem gewählten Kältemittel realisierbar sein muss. Um ein Eindringen von Fremdgasen und Feuchtigkeit zu vermeiden, sollten Kälteanlagen nicht im Vakuum betrieben werden. Die DIN EN 12263 lässt bei Niederdruckwächtern eine Schwankung von 0,25 bar zu, was bedeutet, dass der minimal zulässige Saugdruck einen Wert von 0,25 bar im Regelbetrieb nicht unterschreiten darf. Theoretisch geeignet wären hiernach alle Kältemittel welche bei einer Verdampfungstemperatur von -35°C einen Überdruck von 0,25 bar oder mehr aufweisen.

2.2. Auswahl verschiedener Kältemittel

Der Hersteller TeGa stellt ein breites Sortiment an Kältemitteln zur Verfügung. Mithilfe der TIL Media Suite Berechnungssoftware[5] wurden diverse Kältemittel auf die Eignung zur Tiefkühlanwendung überprüft (Anhang 2). In der Tabelle 2.2.1 wurden jene Kältemittel aufgelistet, welche bei – 35 °C einen Verdampfungsdruck über 0,25 bar aufweisen und einen GWP-Wert von < 2500 besitzen sowie einen ODP-Wert von 0. Der Verdampfungsdruck wird in der Tabelle als Überdruck dargestellt. Das Kältemittel R404A wurde mit gelistet da es in den späteren Berechnungen als Vergleichskältemittel dient. Die Vorauswahl der Kältemittel basiert auf der Produktpalette der Fa. TeGa[6].

Tabelle 2.2.1 nach Drucklage mögliche TK Kältemittel

Kältemittelnummer	Kältemittel	GWP_{100} Wert	Sicherheitsgruppe	Verdampfunsdruck bei – 35°C, in bar
1	R 404A	3922	A1	0,623
2	R 32	675	A2L	1,201
3	R 407F	1825	A1	0,257
4	R4 10A	2088	A1	1,167
5	R 448A	1387	A1	0,270
6	R 449A	1397	A1	0,266
7	R 452A	2140	A1	0,472
8	R 452B	698	A2L	1,004
9	R 454A	239	A2L	0,402
10	R 454B	460	A2L	0,973
11	R 1270	2	A3	0,725
12	R 290	3	A3	0,359
13	R 744	1	A1	11,011
14	R 469A	1357	A1	2,675

[5] TIL Media Suite
[6] TeGa GmbH

Die Zuordnungsnummern der Kältemittel werden in allen späteren Berechnungen beibehalten und dienen so der besseren Übersicht.

2.3. Maximale Füllmenge

Die in der Tabelle 2.2.1 dargestellten Kältemittel haben verschiedene Kategorien hinsichtlich ihrer Brennbarkeit. Nach der DIN EN 378 gibt es bei der Verwendung von brennbaren Kältemitteln Grenzen in Bezug auf die Füllmenge. Innerhalb dieser Norm befinden sich Tabellen wie genau diese Füllmenge in Abhängigkeit von Toxizität und Brennbarkeit berechnet wird. Kältemittel der Gruppe A besitzen geringe bis keine toxischen Eigenschaften, weshalb die Berechnung der Toxizität entfällt. Hinsichtlich der Brennbarkeit werden die Kältemittel in 4 Kategorien unterteilt:
1 = keine Brennbarkeit
2L = geringe Brennbarkeit
2= mäßige Brennbarkeit
3 = hohe Brennbarkeit

Tabelle C.2 — Anforderungen an die maximal zulässige Kältemittel-Füllmenge für Kälteanlagen auf Grundlage der Brennbarkeit

Brennbarkeitsklasse	Kategorie des Zugangsbereichs		Aufstellungsort-Klassifikation			
			I	II	III	IV
2L	a	Menschlicher Komfort	Nach C.2 und nicht mehr als m_2[a] × 1,5 oder nach C.3 und nicht mehr als m_3[a] × 1,5		Keine Begrenzung der Füllmenge[c]	Füllmenge des Kältemittels nicht mehr als m_3[b] × 1,5
		Andere Anwendungen	20 % × LFL × Raumvolumen und nicht mehr als m_2[a] × 1,5 oder nach C.3 und nicht mehr als m_3[b] × 1,5			
	b	Menschlicher Komfort	Nach C.2 und nicht mehr als m_2[a] × 1,5 oder nach C.3 und nicht mehr als m_3[b] × 1,5			
		Andere Anwendungen	20 % × LFL × Raumvolu-men und nicht mehr als m_2[a] × 1,5 oder nach C.3 und nicht mehr als m_3[b] × 1,5	20 % × LFL × Raumvolumen und nicht mehr als 25 kg[c] oder nach C.3 und nicht mehr als m_3[b] × 1,5		
	c	Menschlicher Komfort	Nach C.2 und nicht mehr als m_2[a] × 1,5 oder Nach C.3 und nicht mehr als m_3[b] × 1,5			
		Andere Anwendungen	20 % × LFL × Raumvolumen und nicht mehr als m_2[a] × 1,5 oder nach C.3 und nicht mehr als m_3[b] × 1,5	20 % × LFL × Raum-volumen und nicht mehr als 25 kg[c] oder nach C.3 und nicht mehr als m_3[b] × 1,5		
		< 1 Person je 10 m²	20 % × LFL × Raumvolumen und nicht mehr als 50 kg[a] oder nach C.3 und nicht mehr als m_3[b] × 1,5	Keine Begrenzung der Füllmenge[c]		

Abbildung 2: Berechnung der maximalen Füllmenge brennbarer Kältemittel

In der Abbildung 2 aus DIN EN 378 ist aufgeführt, wie die Berechnung der maximalen Füllmenge eines A2L-Kältemittels durchgeführt wird. Die Berechnung ist dabei abhängig von der Klassifikation des Aufstellungsortes (I -IV) und der Kategorie des Zugangsbereiches. Im zugrundeliegenden Anwendungsfall dieser Arbeit wird mit der Aufstellungsklassifikation II und dem Zugangsbereich b gerechnet (siehe Abb. 3 und Abb. 4)

Tabelle 4 — Kategorien der Zugangsbereiche

Kategorien	Allgemeine Eigenschaften	Beispiele [a]
Allgemeiner Zugangsbereich **a**	Räume, Gebäudeteile und Gebäude, in denen — Schlafeinrichtungen vorhanden sind — Personen in ihrer Bewegung eingeschränkt sind — sich eine unkontrollierte Anzahl von Personen aufhält — jede Person Zutritt hat, ohne persönlich mit den erforderlichen Sicherheitsvorkehrungen vertraut zu sein	Krankenhäuser, Gerichtsgebäude oder Gefängnisse, Theater, Supermärkte, Schulen, Vortragsräume, Bahnhöfe, Hotels, Wohnungen, Restaurants
Überwachter Zugangsbereich **b**	Räume, Gebäudeteile, Gebäude, in denen sich nur eine begrenzte Anzahl von Personen aufhalten darf, von denen einige mit den allgemeinen Sicherheitsvorkehrungen der Einrichtung vertraut sein müssen	Büro- oder Geschäftsräume, Laboratorien, Räume für allgemeine Fabrikations- und Arbeitszwecke
Zugangsbereich, zu dem nur befugte Personen Zutritt haben **c**	Räume, Gebäudeteile, Gebäude, zu denen nur befugte Personen Zutritt haben, die mit den allgemeinen und besonderen Sicherheitsvorkehrungen der Einrichtung vertraut sind, und in denen Materialien oder Güter hergestellt, verarbeitet oder gelagert werden	Produktionseinrichtungen, z. B. für Chemikalien, Nahrungsmittel, Getränke, Industrie- und Speiseeis, Raffinerien, Kühlhallen, Molkereien, Schlachthöfe, nicht öffentliche Bereiche in Supermärkten

[a] Die Liste der Beispiele ist nicht vollständig.

Abbildung 3: Kategorien des Zugangsbereiches

a) Klasse IV — Belüftetes Gehäuse

Sofern sich alle kältemittelführenden Teile in einem belüfteten Gehäuse befinden, gelten die Anforderungen an einen Aufstellungsort der Klasse IV. Das belüftete Gehäuse muss die Anforderungen nach EN 378-2 und EN 378-3 erfüllen.

b) Klasse III — Maschinenraum oder im Freien

Sofern sich alle kältemittelführenden Teile in einem Maschinenraum oder im Freien befinden, gelten die Anforderungen an einen Aufstellungsort der Klasse III. Der Maschinenraum muss die Anforderungen nach EN 378-3 erfüllen.

c) Klasse II — Verdichter im Maschinenraum oder im Freien

Sofern sich alle Verdichter und Druckbehälter im Maschinenraum oder im Freien befinden, gelten die Anforderungen an einen Aufstellungsort der Klasse II, außer die Anlage entspricht den Anforderungen der Klasse III. Rohrschlangen und Rohrleitungen mit Ventilen dürfen sich in einem Personen-Aufenthaltsbereich befinden.

d) Klasse I — Mechanische Geräte im Personen-Aufenthaltsbereich

Sofern die Kälteanlage oder die kältemittelführenden Teile sich im Personen-Aufenthaltsbereich befindet/befinden, gilt Klasse I, außer sie entspricht den Anforderungen der Klasse II.

Abbildung 4: Anlagenklassifikationen

Die maximalen Füllmengen der brennbaren Kältemittel aus Tabelle 2.2.1 wurden für den Beispielkühlraum zum Vergleich gegenübergestellt. Der Kühlraum hat dabei die Innenabmessungen:
Länge = 2 m
Breite = 3 m
Höhe = 2,5 m
Das Innenvolumen beträgt demnach 15 m^3. Da ein Kühlraum mit Ware belegt ist, wird von einem belegten Volumen von 60 % ausgegangen (Vorgabewert der Danfoss Coolselektor Berechnungssoftware[7]). Das tatsächlich vorhandene Raumvolumen verkleinert sich demnach auf 6 m^3. In der Berechnungsformel der DIN EN 378 wird jedoch explizit das Raumvolumen zur Berechnung verwendet, allerdings ist in der Formel auch ein Faktor von 20% vorhanden. Die maximale Füllmenge wird demnach mit dem kompletten Raumvolumen berechnet. Die Ergebnisse der Füllmengenberechnung brennbarer Kältemittel (Anhang 3) sind in der Tabelle 2.3.1 aufgeführt.

Tabelle 2.3.1 maximale Kältemittelfüllmenge verschiedener Kältemittel

Kältemittel	Kategorie	LFL-Wert in Kg/m^3	Maximale Füllmenge bei Raumvolumen 15 m^3 in kg
R32	A2L	0,307	0,921
R452B	A2L	0,31	0,93
R454A	A2L	0,278	0,834
R454B	A2L	0,297	0,891
R1270	A3	0,046	0,138
R290	A3	0,038	0,114

Der LFL-Wert eines Kältemittels (Lower Flammability Limit) ist die untere Grenze, bei welcher das Kältemittel-Luft-Gemisch zündfähig ist. Die LFL-Werte stammen aus dem Anhang E der DIN EN 378/I. Für den Beispielkühlraum wurde eine Kühllastberechnung mithilfe der „Danfoss Coolselektor Software“ durchgeführt (Anhang 4). Als Ergebnis

[7] Danfoss Coolselector.

wurde eine erforderliche Kälteleistung von 1,093 kW berechnet. Mithilfe diverser Wartungsprotokolle der Fa. ST Gebäudetechnik (Anhang 5) wurden verschiedene Tiefkühlanlagen miteinander verglichen, um eine Größenordnung der Kältemittelfüllmenge zu ermitteln. In einer Berechnung (Anhang 6) wurden leistungsabhängige Füllmengen ermittelt. Ein Mittelwert wurde nicht gebildet, da die Rohrleitungslängen der Anlagen zum einen nur geschätzt wurden, zum anderen stark unterschiedlich sind. Der Beispielkühlraum hatte ein Volumen von 15 m^3 und eine benötigte Kälteleistung von 1,093 kW. Die Leistungsabhängigen Füllmengen sind in Tabelle 2.3.2 dargestellt.

Tabelle 2.3.2 Leistungsabhängige Füllmengen		Füllmenge	Kältemittel	Leistung	geschätzte Länge der	Füllmenge pro kW
Nr.	Anlagenbezeichnung	in kg	R404A	in kW	Flüssigkeitsleitung in m	in kg/kW
1	SCK Schönefeld TK Halal	21,5	R404A	9,5	50	2,263157895
2	SCK Schönefeld TK Halal neu	4,2	R449A	1,1	20	3,818181818
3	SCK Schönefeld TK Erw. 1	20	R404A	9,5	50	2,105263158
4	BBW Oberlin TK 1	2,3	R404A	1,35	20	1,703703704
5	BBW Oberlin TK 2	2,3	R404A	1,35	20	1,703703704
6	BBW Oberlin TK 4	3,9	R404A	1,3	30	3
7	Potsdamer Tafel	4,4	R404A	1,76	5	2,5
8	Klinikum BRB	12	R404A	1,8	>100	6,6666667

Unter der Voraussetzung, dass Kühlraumgröße und Kälteleistung korrelieren und die Füllmengen der unterschiedlichen Kältemittel auch ähnlich sind, werden die Einsatzmöglichkeiten eines A3-Kältemittels stark eingeschränkt (vgl. maximale Füllmengen Tabelle 2.3.1). Der Einsatz eines A2L-Kältemittels zur Tiefkühlanwendung für den Beispielkühlraum wäre nach den zugrundeliegenden Füllmengen der Beispielanlagen auch ausgeschlossen, allerdings könnten einzelne Systeme mit kurzen Kältemittelleitungen und füllmengenoptimierten Anlagenkomponenten zulässig sein. In den weiteren Berechnungen werden dennoch alle ermittelten Tiefkühlkältemittel aus der Tabelle 2.2.1 betrachtet.

2.4. Thermodynamische Eigenschaften

In der Tabelle 2.4.1 wurden verschiedene Stoffdaten der ausgewählten Kältemittel dargestellt. Die Werte unter den Spalten 2, 3, 4 und 8 wurden mithilfe der „Danfoss Reftools Software“ ermittelt[8], die unter 5, 6 und 7 mithilfe der „TIL Media Suite Berechnungssoftware“[9].

Tabelle 2.4.1 Thermodynamische Eigenschaften der Kältemittel

	1	2	3	4	5	6	7	8
Nr.	KM	t_0 bei $p_{Amb.}$	t_{krit} in °C	Temperatur-gleit in K	bei t_c = 45 °C p_c in bar	Sauggasdichte in kg/m³ (p_0=-31°C, t_{0H}=-21°C)	Verdampfungswärme in kJ/kg (bei t_0=-31°C)	Molmasse in g/Mol
1	R404A	-46,2	72,1	0,8	19,580	9,623	190,2	97,6
2	R 32	-51,7	78,1	0	26,935	6,954	358,1	52,0
3	R 407F	-46,1	82,6	6,4	20,638	6,271	241,8	82,06
4	R 410A	-51,4	71,3	0,1	26,322	9,591	254,5	72,6
5	R 448A	-46,12	82,7	6,2	20,146	6,648	226,8	86,3
6	R 449A	-45,7	-82,1	5,7	19,854	6,732	224,6	87,2
7	R 452A	-46,9	75,1	3,8	20,426	9,179	183,6	103,5
8	R 452B	-50,7	77,1	0,9	25,099	7,728	292,2	63,5
9	R 454A	-47,8	81,7	5,7	20,921	6,831	235,2	80,5
10	R 454B	-50,5	78,1	1	24,842	7,496	296,7	62,6
11	R1270	-47,6	91,1	0	17,499	3,981	418,5	42,1
12	R290	-42,1	96,74	0	14,330	3,268	413,5	44,1
13	R 744	--------	31	0	72,681	33,475	305,0	44
14	R 469A	-78,5	57,1	17	53,892	13,205	273,4	59,1

[8] Danfoss Ref Tools
[9] TIL Media Suite

In den weiteren Berechnungen wäre demnach die kritische Temperatur t_{Krit} des Kältemittels R744 zu beachten und des Weiteren der Tripelpunkt des von – 56,6 °C (5,18 bar), unterhalb dieser Temperatur liegt keine Flüssigphase des Stoffes mehr vor, sondern als sogenanntes Trockeneis in fester Form oder als Gas.

Bei Stoffen mit Temperaturgleit können jedem Druck zwei Temperaturen zugeordnet werden, z.B. eine obere und eine untere Siedetemperatur. Bei der unteren Siedetemperatur beginnt der Stoff zu sieden, bei der oberen ist gerade ein Dampfanteil von 100 % erreicht worden. Bei den Kältetechnischen Berechnungen ist also zwingend darauf zu achten, dass bei einer Verflüssigungstemperatur von beispielsweise 35 °C der höhere Druck betrachtet wird, bei welchem die Verflüssigung zu 100 % erfolgt ist. Bei der Verdampfung wird der geringere Druck benötigt, da bei einer Verdampfungstemperatur von beispielsweise – 30 °C am Verdampferausgang das Kältemittel 100 % dampfförmig vorliegen soll.

Tabelle 2.4.2 volumetrische Kälteleistung

Nummer	Kältemittel	q_V in kJ/m^3
1	R404A	885,70
2	R 32	1623,76
3	R 407F	876,66
4	R 410A	1402,00
5	R 448A	840,08
6	R 449A	838,45
7	R 452A	822,65
8	R 452B	1372,33
9	R 454A	894,43
10	R 454B	1359,18
11	R1270	1053,18
12	R290	847,64
13	R 744	4713,83
14	R 469A	1840,53

In der Fachliteratur[10] wird auf einen Zusammenhang zwischen Molmasse und Verdichtungsendtemperatur hingewiesen sowie auf einen Zusammenhang zwischen Molmasse und spezifischer Verdichtungsarbeit. Demnach wären bei Kältemitteln mit relativ großen Molmassen kleinere Verdichtungsendtemperaturen zu erwarten und auch eine geringere spezifische isentrope Verdichtungsarbeit, allerdings auch geringere Verdampfungsentalpien.

Mithilfe der Sauggasdichte lässt sich die spezifische volumetrische Kälteleistung ermitteln (q_v =ρ*[h1-h4]), diese korreliert mit der Größe des Verdichters[11]. Zur Ermittlung dieser Leistung wird die spezifische Verdampfungsenthalpie (h1-h4) benötigt, welche vom verwendeten Kältemittel und den herrschenden Betriebsbedingungen abhängig ist. In der Tabelle 2.4.2 wurden die volumetrischen Kälteleistungen der ausgewählten Kältemittel berechnet. Als Betriebsbedingung sind folgende Parameter definiert:

Verdampfungstemperatur t_0= - 31°C

Verflüssigungstemperatur t_c= 45°C

Flüssigkeitsunterkühlung t_{cu}= 2 K

Sauggasüberhitzung t_{0h}= 10 K

[10] Kältetechnik, Maurer S 347
[11] Recknagel 78. Auflage, S. 2295

3. Berechnungen zur energetischen Effizienz für den Anwendungsfall einer Tiefkühlanlage

In diesem Kapitel werden Berechnungen zur energetischen Effizienz, der in Kapitel 2 bestimmtem Kältemittel durchgeführt. Dabei werden drei verschiedene Anwendungsfälle betrachtet:

- Einstufiger Kreislauf
- Kreislauf mit zweistufiger Verdichtung
- Kaskadenschaltung

In Kapitel 2 wurden zur Eignungsuntersuchung die Extrembedingungen definiert, denen das Kältemittel ausgesetzt ist. Für die energetische Betrachtung werden andere Rahmenbedingungen gesetzt, da der Extremfall nicht den normalen Betriebszustand abbildet.

Lufteintrittstemperatur am VDA = -20 °C
Verdampfungstemperatur t_0 = -27 °C
Sauggasüberhitzung am VDA Ausgang = 6 K (Annahme)

Die Verdampfungstemperatur ergibt sich aus der Temperaturdifferenz zur Sauggasüberhitzung und der Differenz zwischen Sauggasüberhitzung und Lufteintrittstemperatur am Verdampfer, welche bereits in einem Auslegungsbeispiel (Kapitel 2.1: Anhang 1) ermittelt wurde. In den betrachteten Anwendungsfällen wird davon ausgegangen, dass über die Sauggasleitung, aufgrund ihrer Länge, ein Druckverlust entsteht.

Druckverlust Saugleitung Δp_{SL} = 2 K

Weiterhin wird mit einer Erwärmung des Sauggases auf dem Weg zum Verdichter gerechnet.

Verdichteransaugtemperatur t_{VDI1} = 0°C

Für die Verflüssigungstemperatur wurden drei unterschiedliche Szenarien untersucht.

Verflüssigungstemperatur I = 45 °C
Verflüssigungstemperatur II = 35 °C
Verflüssigungstemperatur III = 25 °C

Dabei wird immer von der gleichen Flüssigkeitsunterkühlung ausgegangen.

Flüssigkeitsunterkühlung Δt_{cu} = 2 K

Das Kältemittel R744 (CO_2) hat eine kritische Temperatur von 31 °C. Oberhalb dieser Temperatur ist keine Verflüssigung mehr möglich, weshalb der Verflüssiger dann als

Gaskühler bezeichnet wird. Die Wärmeabgabe erfolgt nicht latent, sondern sensibel bei Temperaturänderung. Aus diesem Grunde kann dem Kältemittel kein eindeutiger Hochdruck zugeordnet werden. Diese Problematik soll in der Abbildung 5 verdeutlicht werden. In dieser Abbildung ist ein Ausschnitt des Log(p)-h-Diagrammes von R744 abgebildet. Darin sind drei Kreisläufe dargestellt, welche von einem gemeinsamen Startpunkt 1 auf verschiedene Drücke arbeiten. Die Ausgangstemperatur des Wärmeübertragers (Punkt 3) ist bei jedem Kreislauf gleich, Dennoch sind die spezifischen Enthalpiedifferenzen (Verdampfungsenthalpie, Verflüssigungsenthalpie, isentrope Verdichtungsarbeit) in jedem Kreislauf unterschiedlich.
Verdampfungsenthalpie q_0 = h1 – h4
Verflüssigungsenthalpie q_c = h2 – h3
Spezifische isentrope Verdichtungsarbeit w_{is} = h2 – h1

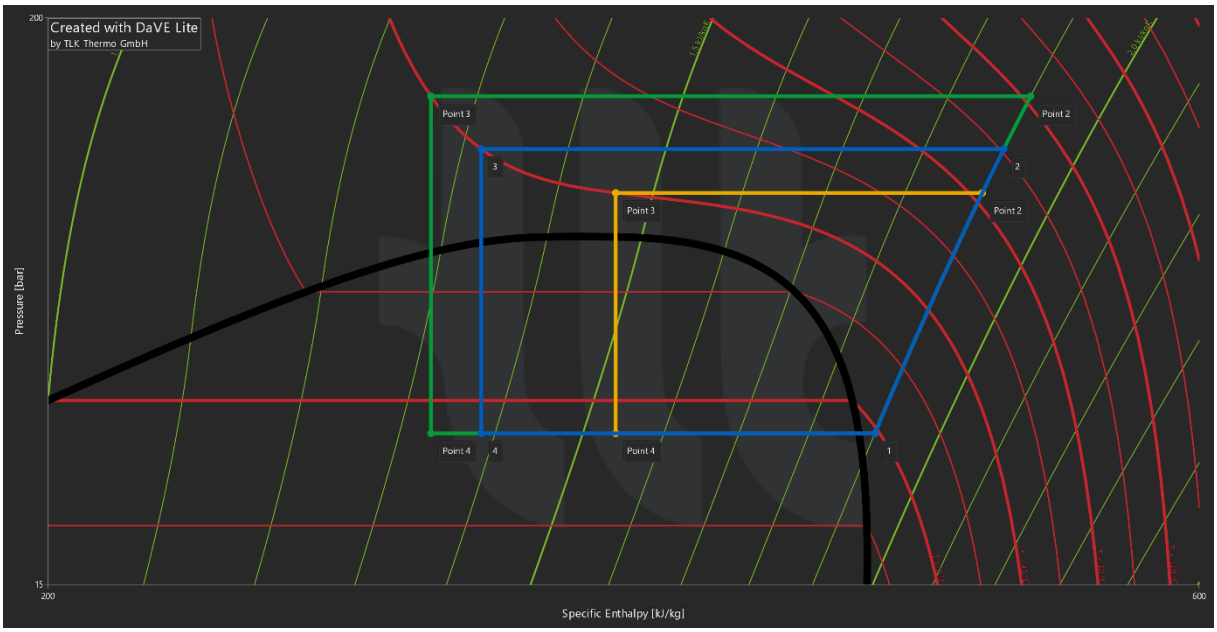


Abbildung 5: Variabler Hochdruck von CO2 im transkritischen Prozess

Damit ein Vergleich zu den anderen Kältemitteln möglich ist, wird die Austrittstemperatur am Gaskühler den Austrittstemperaturen der Verflüssiger gleichgesetzt. In einer separaten Berechnung (Anhang 7) wurde der optimale Hochdruck für die jeweilige Gaskühleraustrittstemperatur ermittelt (Tabelle 3.0.1). Da bei 25°C wieder eine Verflüssigung möglich ist, entfällt die Berechnung des optimalen Hochdruckes für eine Austrittstemperatur von 23°C am Gaskühler. Die dargestellten sind Absolutwerte.

Tabelle 3.0.1: Idealer Hochdruck von R744	
Gaskühleraustrittstemperatur	Optimaler Hochdruck (p_{abs})
43 °C	120 bar
33 °C	87 bar
23 °C	/

In einigen Berechnungen werden reale und ideale Werte bestimmt. Der ideale Wert bildet in den folgenden Berechnungen immer das Ergebnis bei einem isentropen Verdichtungsvorgang ab, bei welchen das Kältemittel keine zusätzliche Wärmeaufnahme durch Verluste beim Verdichtungsvorgang erfährt. Beispiele dafür sind: ideale Verdichtungsendtemperatur t_{v2}, ideale spezifische Verdichtungsarbeit w_{is}, ideale COP-Werte. Wurden die Werte nicht mit einem der beiden Indizes versehen- ist in dieser Arbeit vom realen Werten auszugehen.

3.1. Einstufiger Prozess

Im einstufigen Kreislauf wird das Kältemittel von einem oder mehreren parallel betriebenen Verdichtern in einem Arbeitsschritt von Niederdruck auf Hochdruck verdichtet. Daraus resultieren einige Nachteile: Durch das hohe Druckverhältnis stellen sich bei Isentroper Verdichtung entsprechend hohe Heißgastemperaturen ein. Diese fallen je nach Kältemittel unterschiedlich aus. In Kapitel 2 wurde bereits auf den Zusammenhang von Molmasse und Erwärmung bei Verdichtung hingewiesen. Ein weiteres Problem ist der Wirkungsgrad des Verdichters, welcher bei hohen Druckverhältnissen abnimmt[12]. Die Abnahme des Wirkungsgrades hat eine weitere Erwärmung des Kältemittels zur Folge.

Ab einer bestimmten Temperatur besteht die Gefahr, dass eine Ölverkokung eintritt. Je nach Ölsorte gibt es verschiedene Einsatzgrenzen für das Öl[13]. Die Angaben zu den maximalen Heißgastemperaturen der Verdichterhersteller sind deshalb zu beachten. Der häufig dazu genannter Wert dazu ist eine Temperatur von 150°C am Druckstutzen des Verdichters[14], wobei explizit von kurzzeitig höheren Temperaturen um ca. 30 K im Zylinderraum gesprochen wird. In den Berechnungen zur energetischen Effizienz wurden deshalb die Heißgastemperaturen mit berechnet. Ein klassischer Anwendungsfall der einstufigen Tiefkühlkälteanlagen sind kompakte Verflüssigungssätze mit halb - oder vollhermetischen Verdichtern. In der Abbildung 6 ist das R&I-Fließbild dieses Kreislaufes dargestellt. Mithilfe der „Bitzer Auslegungssoftware“[15] wurden für die zugrundeliegenden Betriebsbedingungen einige Verflüssigungssätze ausgelegt. Zweck dieser Auslegungen war das Ermitteln des Verdichterwirkungsgrades bei einstufigen Tiefkühlanlagen. Die Berechnungen befinden sich im Anhang 8. Auf Grundlage dieser Berechnung wurde der Wirkungsgrad des Verdichters beim einstufigen Prozess mit 0,55 angesetzt. Der berechnete Mittelwert liegt bei 0,585, es wird jedoch mit einkalkuliert, dass sich die Effizienz des Verdichters im Laufe seiner

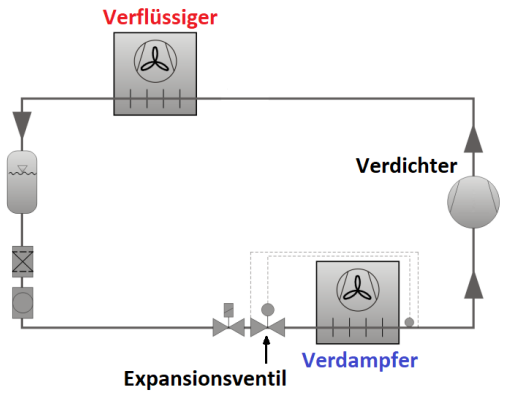


Abbildung 6: R&I-Fließbild einstufiger Prozess

[12] Thomas Maurer S. 96
[13] DIN 5103
[14] Thomas Maurer S. 377
[15] Bitzer Auslegungssoftware

Lebensdauer verschlechtert. Die Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse der Berechnungen des einstufigen Kreislaufmodells (Anhang 9).

	Modell 1 Einstufiger Prozess						
	Ergebnissezu I, t_c =		45 °C				
	Kältemittel	COP_{ideal}	COP_{real}	t_{V2} in °C	t_{V2} in °C	Druckverhältnis	
				ideal	real	p_c/p_0	
1	R404A	1,701	0,936	81,31	119,28	9,77202315	
2	R 32	1,990	1,095	148,04	227,72	9,809367464	
3	R 407F	1,789	0,984	109,07	166,32	12,93043652	
4	R 410A	1,878	1,033	111,85	168,31	9,740969638	
5	R 448A	1,751	0,963	101,59	153,96	12,56978719	
6	R 449A	1,761	0,969	99,94	151,17	12,38509295	
7	R 452A	1,636	0,900	84,72	125,34	11,18282379	
8	R 452B	1,921	1,057	122,87	186,73	10,05991092	
9	R 454A	1,735	0,954	102,83	155,04	11,9144089	
10	R 454B	1,924	1,058	123,93	188,52	10,11294219	
11	R1270	2,008	1,104	92,96	141,43	8,375014244	
12	R290	2,019	1,110	83,56	126,79	8,790802441	
13	R 744	1,123	0,618	171,46	253,79	8,128350255	
14	R469A	1,294	0,712	148,65	224,05	11,6142347	

Abbildung 7: Ergebnisse zu den Berechnungen des einstufigen Prozesses bei 45 °C Verflüssigung

Die Tabelle zeigt die berechneten Werte bei den oben genannten Bedingungen und einer Verflüssigungstemperatur von 45°C. Die idealen Heißgastemperaturen würden bei isentroper Verdichtung auftreten. Je geringer der Wirkungsgrad des Verdichters desto höher werden die realen Heißgastemperaturen. Unter den gegebenen Umständen liegen alle Verdichtungsendtemperaturen über 100 °C. Bei einer Einsatzgrenze von 150 °C Druckstutzentemperatur wären unter diesen Bedingungen bereits einige Kältemittel nicht mehr einsetzbar. Davon ausgehend, dass die Druckstutzentemperatur des Verdichters um ca. 30 K unter der berechneten Temperatur liegt[16], wären alle Kältemittel mit einer berechneten Verdichtungsendtemperatur über 180 °C unzulässig. Aus energetischer Sicht wären einige der aufgeführten Kältemittel besser geeignet als das Referenzkältemittel R404A. Die energetische Effizienz spiegelt sich in den COP-Werten (Coeffizient of Performance) wieder, welche wie folgt berechnet werden:

$COP = q_0/w_{el}$ bzw Q_0/P_{el}

[16] Thomas Maurer S 95

Da in dieser Arbeit die Kältemittel untereinander verglichen werden, sind weitere Verbraucher wie Lüfter und Abtauheizungen zur Berechnung der COP-Werte nicht relevant. Um den Einfluss des Verdichterwirkungsgrades zu verdeutlichen, wurde in der Berechnung wieder zwischen idealem und realem COP-Wert unterschieden. Bei sinkenden Verflüssigungstemperaturen steigen die COP-Werte für diesen Anwendungsfall an. In Abbildung 8 sind die Ergebnisse für eine Verflüssigungstemperatur von 35°C dargestellt. Im Vergleich zur Abbildung 7 haben sich alle COP-Werte verbessert.

	Ergebnissezu II, t_c =		35 °C				
	Kältemittel	COP_{ideal}	COP_{real}	t_{V2} in °C	t_{V2} in °C	Druckverhältnis	
				ideal	real	p_c/p_0	
1	R404A	2,249	1,237	71,08	106,33	7,685260157	
2	R 32	2,477	1,362	130,22	202,49	7,68607027	
3	R 407F	2,233	1,228	97,10	150,12	10,14440152	
4	R 410A	2,395	1,317	98,20	149,77	7,643192154	
5	R 448A	2,204	1,212	90,32	138,93	9,885921053	
6	R 449A	2,221	1,221	88,76	136,31	9,735370083	
7	R 452A	2,139	1,176	74,69	112,59	8,815518107	
8	R 452B	2,412	1,326	108,24	166,54	7,901169973	
9	R 454A	2,188	1,203	91,34	139,78	9,402845671	
10	R 454B	2,411	1,326	109,22	168,20	7,94422048	
11	R1270	2,541	1,398	81,62	126,24	6,669748909	
12	R290	2,547	1,401	73,57	113,49	6,977822664	
13	R 744	1,528	0,841	140,68	209,94	5,893053935	
14	R469A	1,673	0,920	134,79	205,02	9,557971032	

Abbildung 8: Ergebnisse zu den Berechnungen des einstufigen Prozesses bei 35 °C Verflüssigung

In Abbildung 9 sind alle COP-Werte aus dem einstufigen Berechnungsmodell abgebildet. In dieser Abbildung ist erkennbar, dass sich die Kältemittel in ihrer Rangliste minimal verschieben. Beispielsweise ist das Kältemittel R410A bei einer Verflüssigung von 45°C aus energetischer Sicht schlechter als R407F, bei einer Verflüssigung von 25 °C jedoch besser. Die Betriebsbedingungen spielen beim energetischen Vergleich also auch eine Rolle.

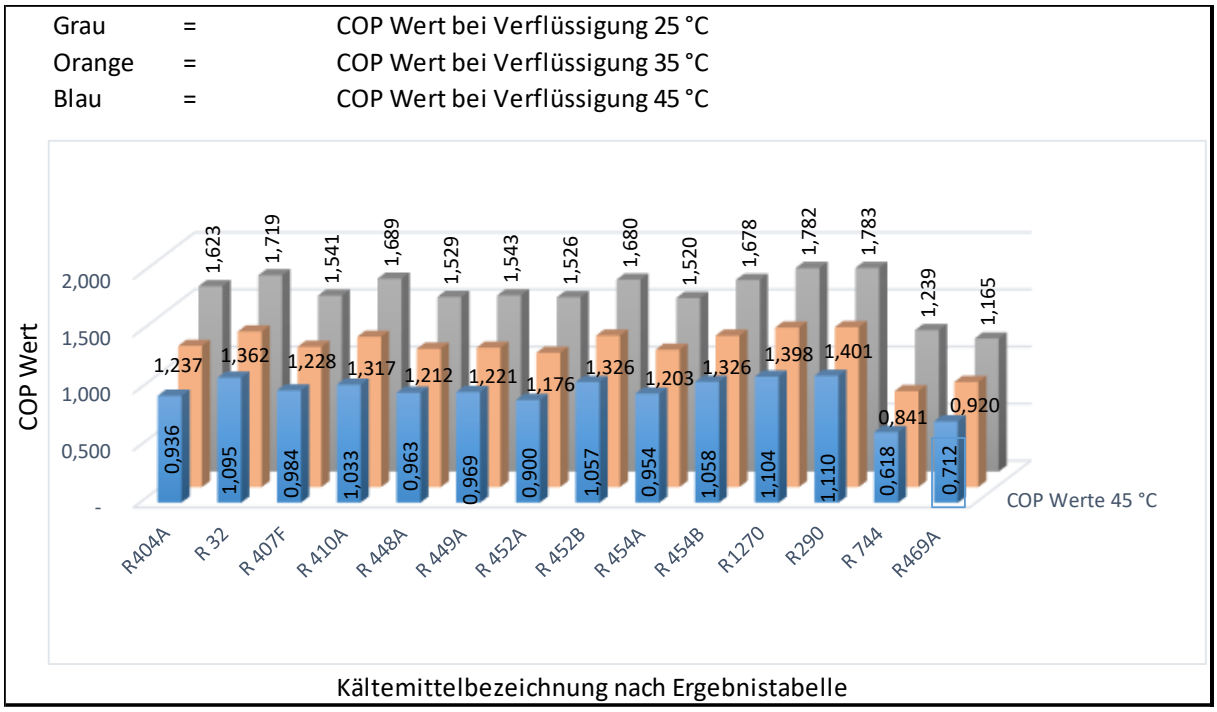


Abbildung 9 : COP Werte des einstufigen Berechnungsmodelles bei verschiedenen Verflüssigungstemperaturen

Aus energetischer Sicht schneiden nach dieser Berechnung sechs Kältemittel vergleichsweise gut ab, diese sind in Tabelle 3.1.1 aufgelistet. Zu Vergleichszwecken wurden R404A und R452A mit aufgeführt. Im Vergleich zu R404A ist die energetische Effizienz dieser sechs Kältemittel sogar besser. Die Verdichtungsendtemperaturen sind allerdings deutlich höher, eine Ausnahme stellt da Kältemittel Propan (R290) dar.

Tabelle 3.1.1 energetische Effiziente Kältemittel den Vergleichskältemitteln R404A und 452A

Nr.	Kälte-mittel	COP_{real} bei t_c= 45°C	COP_{real} bei t_c= 35°C	COP_{real} bei t_c= 25°C	Verdichtungsend-temperatur t_{V2}, bei t_c= 45°C	t_{v2} bei ungünstigen Kreislaufbedingungen
1	R404A	0,936	1,237	1,623	119,28	179,82
2	R32	1,095	1,362	1,719	227,72	330,80
3	R410A	1,033	1,317	1,689	168,31	249,07
8	R452B	1,057	1,326	1,680	186,73	273,33
10	R454B	1,058	1,326	1,678	188,52	275,56
11	R1270	1,104	1,398	1,782	141,43	207,51
12	R290	1,110	1,401	1,783	126,79	186,65
7	R452A	0,900	1,176	1,526	125,34	186,87

Beeinflusst wird die Temperatur von verschiedenen Faktoren, unter anderem dem Druckverhältnis und der Verdichteransaugtemperatur. Bei ungünstigeren Bedingungen sind höhere Verdichtungsendtemperaturen möglich. In der Tabelle 3.1.1 wurden diese entsprechenden Temperaturen ebenfalls mit aufgeführt, die

entsprechende Berechnung befindet sich im Anhang 10. Die Betriebsbedingungen waren in diesem Fall wie folgt:

Verflüssigungstemperatur t_c = 55 °C

Verdichteransaugdruck t_0 = -35 °C

Verdichteransaugtemperatur t_{v1} = 20 °C

Da dieser Betriebszustand nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden kann, bleiben als geeignete Kältemittel das R452A und R290 übrig und selbst bei diesen Kältemitteln liegt die maximale Verdichtungsendtemperatur leicht über dem empfohlenen Wert. Die energetische Effizienz von R452A ist etwas geringer als beim Kältemittel R404A, allerdings ist der GWP-Wert mit 2140 deutlich geringer als der vom R404A mit 3922. Das Kältemittel R290 hat einen niedrigen GWP-Wert von 3 und eine verhältnismäßig hohe Effizienz, gehört allerdings zur Gruppe A3 und ist damit brennbar.

Tabelle 3.1.2 Kältemittel im Vergleich

Nr.	Kältemittel	Ideale Heißgastemperatur bei t_c = 45°C	VDA Enthalpie bei t_c = 45 °C	spez. ideale VDI-Arbeit bei t_c= 45°C	Molmasse
1	R 404A	81,31	91,23	53,62	97,6
2	R 32	148,04	231,62	116,36	52,0
3	R 407F	109,07	138,90	77,66	82,06
4	R4 10A	111,85	144,82	77,10	72,6
5	R 448A	101,59	125,55	71,70	86,3
6	R 449A	99,94	123,73	70,26	87,2
7	R 452A	84,72	88,95	54,37	103,5
8	R 452B	122,87	176,13	91,68	63,5
9	R 454A	102,83	130,03	74,94	80,5
10	R 454B	123,93	179,86	93,47	62,6
11	R 1270	92,96	242,94	121,01	42,1
12	R 290	83,56	237,33	117,56	44,1
13	R 744	171,46	137,09	122,04	44
14	R 469A	148,65	138,82	107,29	59,1

In der Tabelle 3.1.2 wurden einige der berechneten Werte den Molmassen der verschiedenen Kältemittel gegenübergestellt. R 404A mit einer vergleichsweise hohen Molmasse hat eine verhältnismäßig geringe Heißgastemperatur sowie eine geringe spezifische Verdampfungsenthalpie und eine geringe spezifische Verdichtungsarbeit. In diesem Falle trifft die Korrelation mit der Molmasse welche in Kapitel 2.4. erwähnt wurde zu, auch bei den meisten anderen betrachteten Kältemitteln. Ausnahmen stellen die Kältemittel R1270 und R290 dar, bei welchen zwar die Korrelation zur Vorhersage der spezifischen Enthalpien stimmt, aber die Heißgastemperatur sich genau entgegen dieser vorhersage verhält. Die Korrelation zwischen der Molmasse und den Stoffeigenschaften trifft offenbar nicht bei jedem Kältemittel zu, nach den Ergebnissen der Tabelle 3.1.2 war diese jedoch in den meisten Fällen vorhanden.

3.2. Zweistufiger Prozess

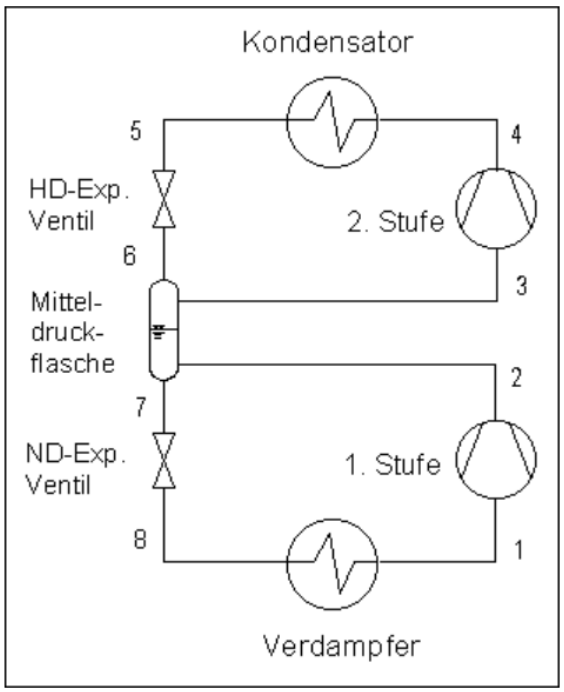


Abbildung 10: RI Fließbild zweistufiger Prozess

In den Berechnungen aus Kapitel 3.1. wurde gezeigt, dass die Verdichtungsendtemperaturen einiger Kältemittel deutlich über den zulässigen Betriebsbedingungen liegen. In diesem Kapitel wird deshalb zum einem die Verdichtung in zwei Stufen realisiert, zu anderen wird das Heißgas der ersten Verdichtungsstufe auf die jeweilige Kondensationstemperatur abgekühlt. Der Verdichter der zweiten Verdichtungsstufe (Hochdruckverdichter) saugt demnach trockengesättigten Dampf an (s. Abbildung 10).

Im Berechnungsmodell wurde zusätzlich der Mitteldruck für das jeweilige Kältemittel, bei vorhandenem Hochdruck, ermittelt. Bei der Berechnung des Mitteldruckes wurde vorausgesetzt, dass die Druckverhältnisse, welche die beiden Verdichter überwinden müssen, gleich groß sind. Mathematisch formuliert lautet das: $\frac{p_c}{p_m} = \frac{p_m}{p_0}$, umgestellt nach p_m ergibt sich folgende Gleichung: $p_m = \sqrt{p_c * p_0}$. Der einstufige Kältekreislauf wurde um folgende Komponenten erweitert:

- zweiter Verdichter
- zweites Drosselorgan
- Mitteldruckflasche

Der Prozessablauf ist in der Abbildung 11 im Log(p)-h-Diagramm dargestellt. Das Drosselorgan der Hochdruckstufe führt eine Drosselung des Kältemittels in die Mitteldruckflasche durch (Punkt 5-6). Beim Drosseln des flüssigen Kältemittels entsteht Flashgas. Das Heißgas des Niederdruckverdichters wird ebenfalls von unten durch die Mitteldruckflasche geleitet, durch den Kontakt mit der Flüssigkeit wird das Heißgas abgekühlt (Punkt 2-3). Durch das Abkühlen des Heißgases entsteht jedoch weiteres Flashgas. Das flüssige Kältemittel gelangt über das zweite Drosselorgan in den Verdampfer (Punkt 7-8). Der entstandene Flashgasanteil der Mitteldruckflasche

wird zusammen mit dem gekühlten Heißgas der ersten Verdichterstufe vom Hochdruckverdichter abgesaugt und auf Hochdruck verdichtet[17](Punkt 3-4).

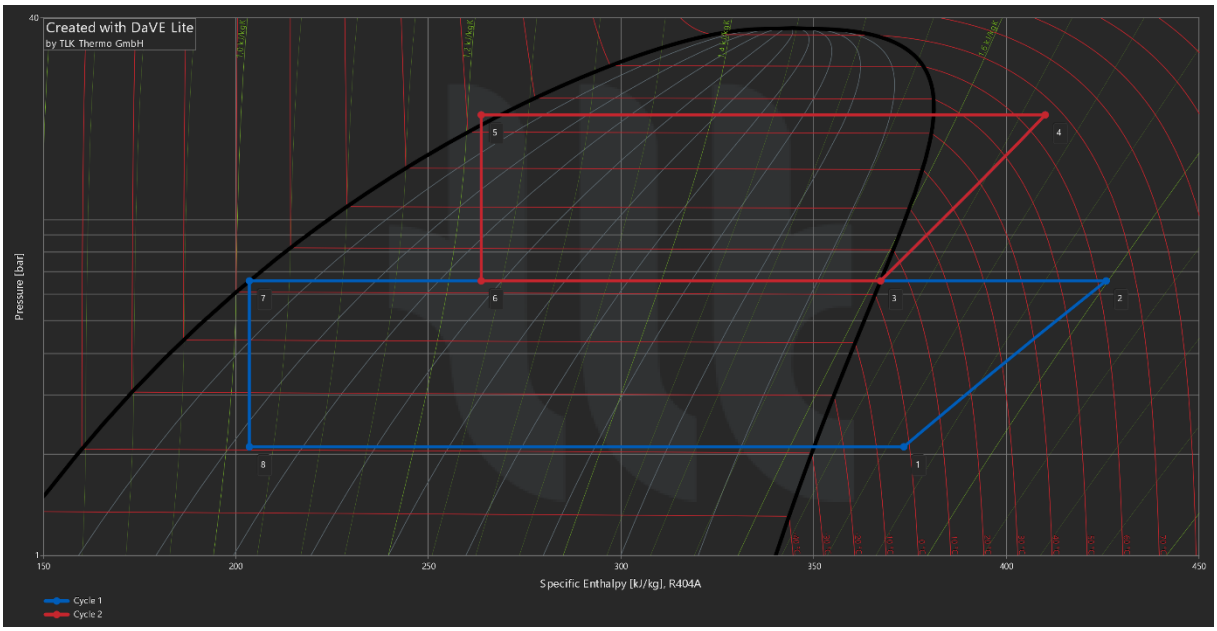


Abbildung 11: zweistufiger Prozess im Log P-H Diagramm

Der Kreislauf in Abbildung 11 ist bewusst in zwei Farben dargestellt, denn obwohl es sich um einen Kältekreislauf handelt, ist der Kältemittelmassenstrom des Hochdruckverdichters höher als der des Niederdruckverdichters. Die Ursache dafür liegt im entstandenen Flashgas und der benötigten Energie zur Heißgaskühlung. Im Log(p)-h-Diagramm zeigt sich dieses Ungleichgewicht durch unterschiedliche Enthalpiedifferenzen. Der Massenstrom des Hochtemperaturverdichters errechnet sich wie folgt: $\dot{m}_{2.Stufe} = \frac{h_2 - h_7}{h_3 - h_6}$. Im Berechnungsmodell des zweistufigen Kreislaufes wird der Massenstrom über den Verdampfer als Referenzwert betrachtet und mit 1 kg/s angesetzt. Der für das jeweilige Kältemittel berechnete Massenstrom des Hochdruckverdichters dient als Korrekturfaktor für die ermittelte spezifische Verdichtungsarbeit. Mit der Summe aus der spezifischen Verdichtungsarbeit des Niederdruckverdichters und der korrigierten Verdichtungsarbeit des Hochdruckverdichters kann somit die spezifische Gesamtverdichtungsarbeit und schließlich der COP-Wert ermittelt werden. In Abbildung 12 sind die Ergebnisse des zweistufigen Berechnungsmodelles (Anhang 11) dargestellt, welche sich bei einer Verflüssigungstemperatur von 45 °C einstellen. Um einen Vergleich zum einstufigen

[17] Thomas Maurer S 109

Modell zu ermöglichen wurde der Wirkungsgrad beider Verdichter wie im einstufigen Modell mit 55 % angenommen.

Ergebnisse zum Hochdruck I 45 °C

	Kältemittel	Hochdruck in bar	Mitteldruck in bar	Niederdruck des Verdampfersin bar	Niederdruck am Verdichter in bar	reale Heißgastemperatur Stufe 1 in °C	reale Heißgastemperatur Stufe 2 in °C	spezifische Verdampfungs-enthalpie in kJ/kg	spezifische Verdichterarbeit 1. Stufe in kJ/kg	spezifische Verdichterarbeit 2. Stufe in kJ/(kg	spezifischer Massenstrom 2. Stufe (kg$_{HD\ Stufe}$/kg$_{ND\ Stufe}$)	korrigierte spezifische Verdichterarbeit 2. Stufe	Gesamtverdichterarbeit 1. und 2. Stufe in kJ/kg	COP Wert	COP Werte bei abkühlung des Heißgases auf t_{au}	Druckverhältnis Gesamt	Druckverhältnis pro Stufe
1	R404A	20,59	6,59	2,29	2,11	59	64	152,91	47,72	40,19	2,14	86,19	133,90	1,14	1,20	9,772	3,126
2	R 32	27,95	8,92	3,09	2,85	111	106	308,28	95,82	83,62	1,81	151,69	247,51	1,25	1,38	9,809	3,132
3	R 407F	21,65	6,02	1,83	1,67	82	86	207,66	66,65	58,75	1,96	115,02	181,67	1,14	1,24	12,93	3,5959
4	R 410A	27,34	8,76	3,04	2,81	83	83	212,26	65,93	56,18	1,98	110,98	176,91	1,20	1,31	9,741	3,1211
5	R 448A	21,16	5,97	1,84	1,68	76	81	193,30	62,12	54,47	2,00	108,77	170,88	1,13	1,22	12,57	3,5454
6	R 449A	20,87	5,93	1,84	1,68	75	80	190,84	60,97	53,37	2,00	106,62	167,60	1,14	1,23	12,39	3,5192
7	R 452A	21,44	6,41	2,08	1,92	62	68	150,87	48,19	41,22	2,15	88,52	136,71	1,10	1,16	11,18	3,3441
8	R 452B	26,11	8,23	2,81	2,60	92	91	248,04	77,49	67,13	1,90	127,23	204,72	1,21	1,33	10,06	3,1717
9	R 454A	21,93	6,35	2,00	1,84	77	82	200,21	64,94	56,61	2,01	113,59	178,53	1,12	1,21	11,91	3,4517
10	R 454B	25,86	8,13	2,77	2,56	93	92	252,35	78,92	68,52	1,89	129,29	208,21	1,21	1,33	10,11	3,1801
11	R1270	18,51	6,40	2,38	2,21	71	75	352,39	105,62	94,01	1,84	172,89	278,51	1,27	1,35	8,375	2,894
12	R290	15,34	5,17	1,89	1,75	64	68	345,95	103,08	92,32	1,84	169,98	273,06	1,27	1,34	8,791	2,9649
13	R 744	120,00	42,09	15,77	14,76	118	107	225,41	98,50	73,68	2,93	215,79	314,29	0,72	0,86	8,128	2,851
14	R469A	54,91	16,11	5,12	4,73	108	110	289,74	89,17	75,64	2,46	186,20	275,38	1,05	1,20	11,61	3,408

Abbildung 12: Ergebnisse zu den Berechnungen des zweistufigen Prozesses bei 45 °C Verflüssigung

Im Vergleich zum einstufigen Berechnungsmodell haben sich die COP-Werte leicht verbessert und die Verdichtungsendtemperaturen sind geringer. Das Kältemittel wird nach der ersten Verdichtungsstufe in der Mitteldruckflasche abgekühlt, dabei verdampft ein Teil des flüssigen Kältemittels. Durch die Abkühlung wird die spezifische Entropie des Sauggases verringert und die Verdichtung der zweiten Stufe findet bei geringerem spezifischen Energieaufwand statt. Zur Verdeutlichung zeigt die Abbildung 13 einen Ausschnitt aus dem Log(p)-h-Diagramm des Kältemittels R 32. Bei unterschiedlichen Entropien findet eine isentrope Verdichtung vom selben Ansaugdruck auf denselben Enddruck statt. Für den Verdichtungsvorgang, welcher bei einer höheren Ansaugentropie stattfindet, wird eine größere spezifische Verdichtungsarbeit benötigt. Bezogen auf den COP-Wert

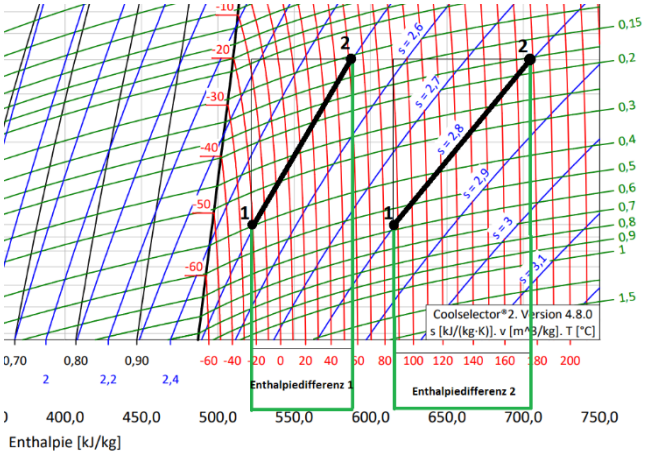


Abbildung 13: Verdichtung bei verschiedenen Ansaugentropien

wird dadurch eine Verbesserung erreicht.

Eine weitere Verbesserung ist möglich, wenn das Heißgas der ersten Verdichtungsstufe vorgekühlt wird. In der Ergebnistabelle wurde mit einer Verflüssigungstemperatur von 45 °C gerechnet und einer Unterkühlung um 2 K auf 43 °C. Unter diesen Umgebungsbedingungen wäre es möglich das Heißgas der Niederdruckstufe auf 43°C abzukühlen, um den Kältemittelmassenstrom über die Mitteldruckflasche zu reduzieren. In Abbildung 14 sind die COP-Werte bei 45 °C Verflüssigungstemperatur für die einstufige Verdichtung (Blau), die Zweistufige Verdichtung ohne Zwischenkühlung (Orange) und mit Zwischenkühlung (Grau) gegenübergestellt.

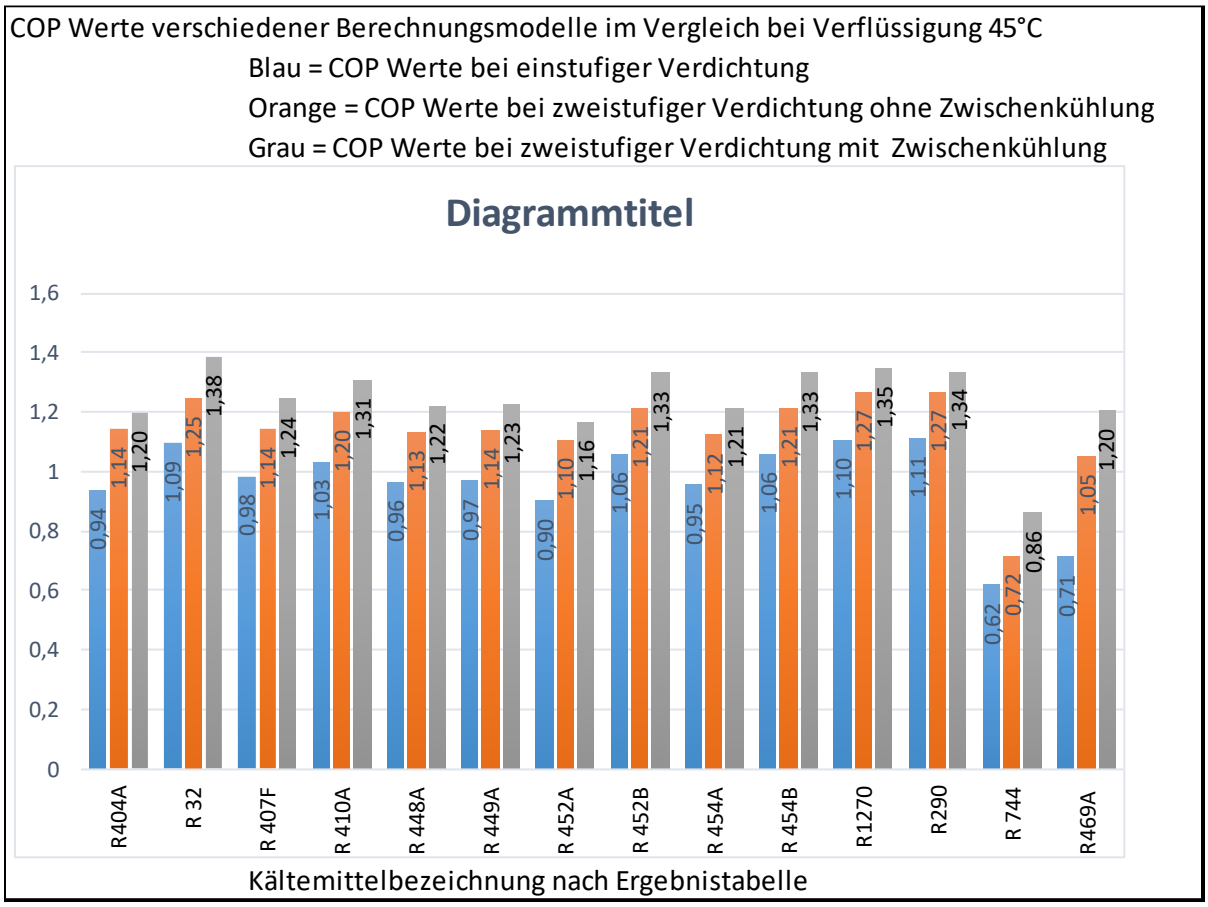


Abbildung 14: COP Werte im Vergleich

In den Ergebnissen zeigt sich bei jedem Kältemittel eine energetische Verbesserung zwischen einstufiger und zweistufiger Verdichtung und eine weitere Verbesserung bei

der Zwischenkühlung des Heißgases der ersten Stufe. In Kapitel 3.1. wurden bereits die sechs Kältemittel mit der höchsten Effizienz in einer Tabelle benannt. Aufgrund der hohen Verdichtungsendtemperaturen waren die meisten der betrachteten Kältemittel für die einstufige Verwendung jedoch ungeeignet. Bei der Berechnung von zweistufigen Prozessen fallen die Verdichtungsendtemperaturen aber geringer aus, wie bereits in Abbildung 12 gezeigt. In Abbildung 15 sind die Verdichtungsendtemperaturen des zweistufigen Prozesses für ungünstige Prozessbedingungen aufgelistet und denen des einstufigen Prozesses für selbige Bedingungen gegenübergestellt. Die Berechnungen zu den ungünstigen Prozessbedingungen befinden sich in Anhang 12. Im Vergleich zur einstufigen Verdichtung sind die Verdichtungsendtemperaturen deutlich geringer. Spitzenwerte von etwa 160°C werden bei den Kältemitteln R32 und R744 (Im Diagramm = Nr.2 und Nr.13) erreicht. Wenn die Druckstutzentemperatur um 30 K geringer ist als die Verdichtungsendtemperatur, wären alle hier aufgeführten Kältemittel einsetzbar. In der besagten Abbildung sind die Verdichtungsendtemperaturen der ersten Stufe höher als jene der zweiten Verdichtungsstufe. Ursache dafür ist die hohe Sauggasüberhitzung des Kältemittels am Eintritt in die erste Verdichtungsstufe, welche zur Berechnung der Werte betrachtet wurde.

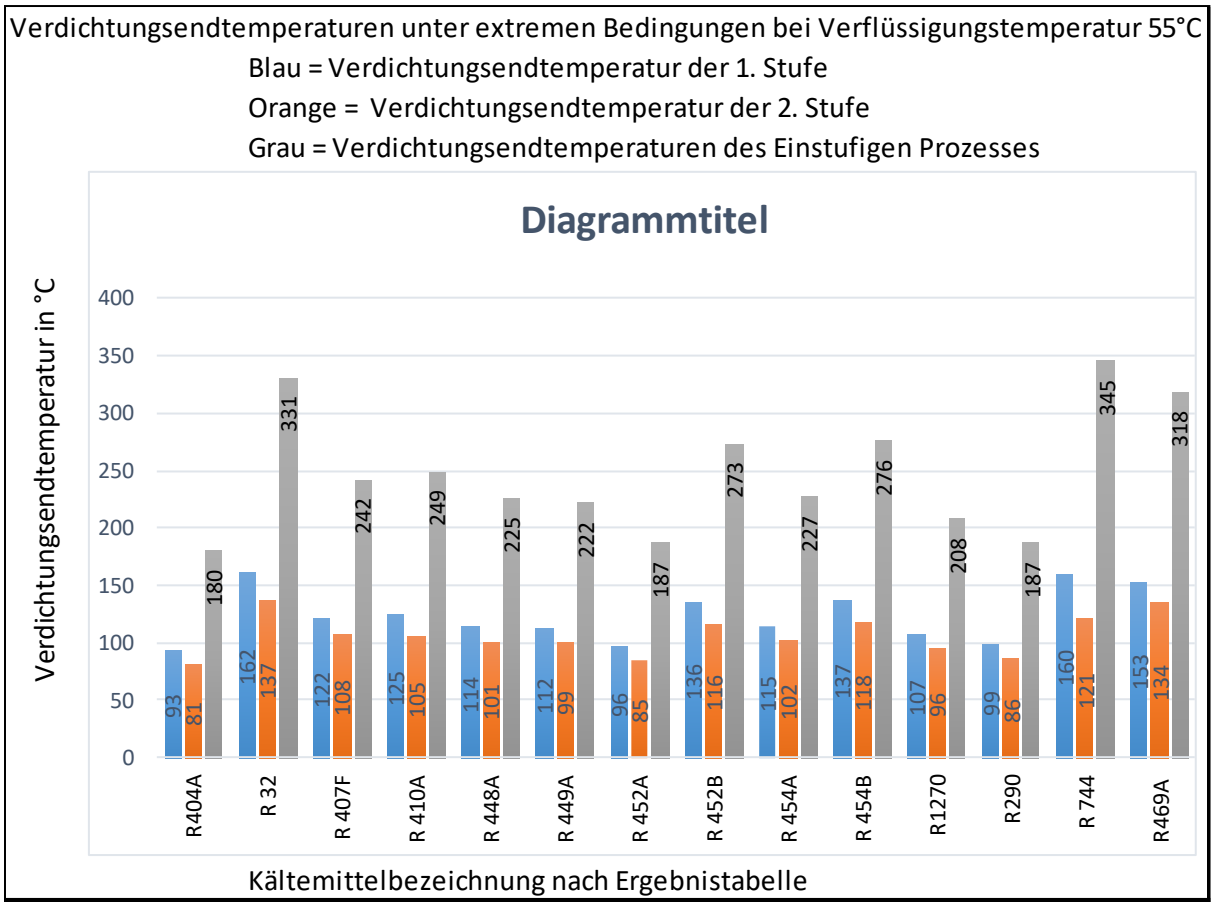


Abbildung 15: Verdichtungsendtemperaturen im Vergleich

Im Berechnungsmodell mit Zwischenkühlung des Heißgases der ersten Stufe ändern sich die Verdichtungsendtemperaturen der Hochdruckstufe nicht, da sich die Ansaugenthalpie nicht verändert. Die Verbesserung der COP Werte ist allein auf die Reduzierung des Massenstromes der Hochdruckstufe zurückzuführen, weshalb auf die Darstellung im Abbildung 15 verzichtet wird.

Im nächsten Diagramm (Abbildung 16) wurde die Änderung der COP-Werte bei sinkenden Verflüssigungstemperaturen für den zweistufigen Prozess dargestellt. Jeder Verflüssigungstemperatur sind zwei COP-Werte zugeordnet, einmal ohne Zwischenkühlung (hellerer Kontrast) und einmal mit Zwischenkühlung (dunklerer Kontrast). Beim Vergleich der COP-Werte bei den verschiedenen Einsatzbedingungen sind es abermals die 6 Kältemittel, welche bereits in Tabelle 3.1.1 aufgelistet wurden, welche einen verhältnismäßig hohen COP-Wert aufweisen.

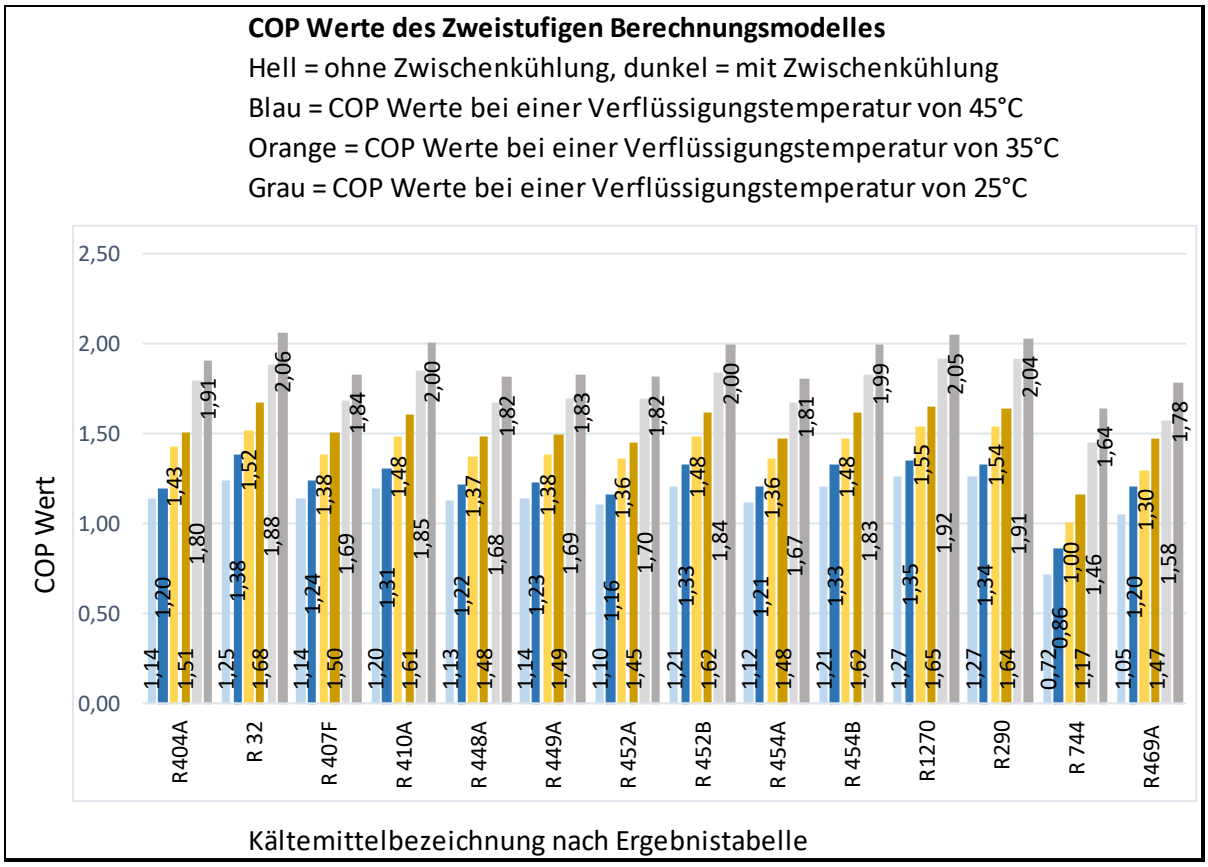


Abbildung 16: COP-Werte bei zweistufiger Verdichtung mit und ohne Zwischenkühlung

3.3. Kaskadenschaltung

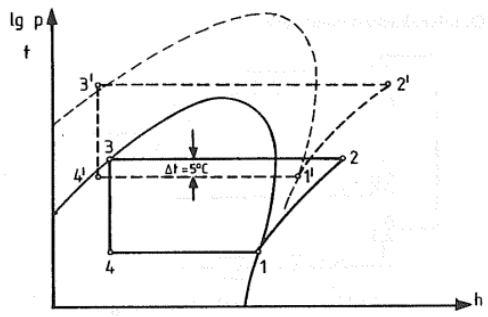


Abbildung 17: Log P-H Diagramm Kaskade

Bei der Kaskadenschaltung werden zwei separate Kältekreisläufe miteinander verknüpft (Abbildung 17). Der Verdampfer der Hochtemperaturstufe (2. Stufe) dient der Niedertemperaturstufe (1. Stufe) als Verflüssiger (Abbildung 18). Durch diesen Umstand wird der Einsatz von zwei verschiedenen Kältemitteln möglich, welche speziell auf ihr Einsatzgebiet abgestimmt sind.

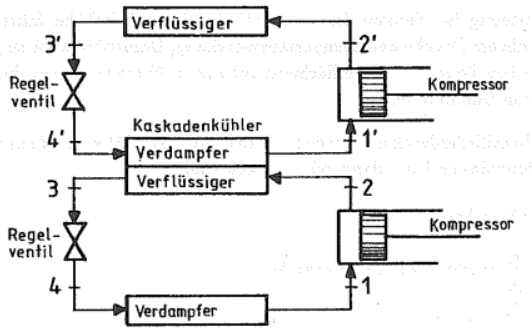


Abbildung 18: RI Fließbild Kaskade

Da sich diese Arbeit auf den Anwendungsfall der Tiefkühlung beschränkt, wird in der Hochtemperaturstufe nur ein ausgewähltes Kältemittel betrachtet und zur Berechnung der energetischen Effizienz verwendet. Im Bereich des Tieftemperaturkreislaufes werden alle der zuvor ermittelten Kältemittel hinsichtlich ihrer energetischen Effizienz betrachtet.

Zur Durchführung der Berechnungen ist es erforderlich einen Mitteldruck zu definieren. Da die verschiedenen Kältemittel unterschiedliche Eigenschaften haben, ist es dafür zunächst notwendig für den Hochtemperaturkreislauf ein Kältemittel zu bestimmen. In den bereits durchgeführten Berechnungen hatte sich, im Rahmen der ausgewählten Kältemittel, R290 als das Kältemittel mit der höchsten energetischen Effizienz herausgestellt. Zur weiteren Untersuchung wurden in einer separaten Berechnung die Betriebsbedingungen der Kältemittel verändert und die Verdampfungstemperatur auf 0°C angehoben (Anhang 13). Auch unter diesen Bedingungen erwies sich das Kältemittel R290 als Spitzenreiter. Auf Grundlage dieser Berechnung wird als Referenzkältemittel der Hochtemperaturseite R290 zur Berechnung des Mitteldruckes genutzt.

Die Mitteldrücke sind dennoch, je nach verwendetem Niedertemperaturkältemittel, unterschiedlich. Bei der Berechnung der Mitteldrucktemperaturen wurden als Außenbedingung der 2. Kaskadenstufe wieder drei verschiedene Verflüssigungstemperaturen betrachtet:

Verflüssigungstemperatur I = 45 °C
Verflüssigungstemperatur II = 35 °C
Verflüssigungstemperatur III = 25 °C

Die Verdampfungstemperatur von – 27 °C am Verdampferaustritt wurde beibehalten, und auch in diesem Berechnungsmodell wurde ein Druckverlust über die Saugleitung von 2 K mit einkalkuliert, sodass der Verdampfungsdruck am Verdichtereintritt entsprechend geringer ist. Bei der Berechnung wurde als Bedingung gesetzt, dass beide Stufen der Kaskade mit dem gleichen Druckverhältnis, unter den in Kapitel 3.0 definierten Bedingungen, arbeiten. Die Ergebnisse der Mitteldruckberechnung (Anhang 14) für eine Verflüssigungstemperatur von 35°C sind in der Tabelle 3.3.1 abgebildet.

Tabelle 3.3.1 Mitteldrücke der Niedertemperaturstufe und zugehörige Temperaturen

Nr.	Kältemittel	Mitteldruck in bar 1. Stufe	Mitteldruck in bar 2. Stufe	Siedetemperatur in °C	Druckverhältnis
1	R404A	5,74	4,47	-1,9	2,72
2	R 32	7,70	4,51	-1,7	2,70
3	R 407F	5,17	3,94	-5,9	3,09
4	R 410A	7,59	4,51	-1,7	2,70
5	R 448A	5,16	3,97	-5,7	3,07
6	R 449A	5,12	4,01	-5,4	3,04
7	R 452A	5,59	4,18	-4,1	2,92
8	R 452B	7,14	4,43	-2,2	2,75
9	R 454A	5,56	4,04	-5,2	3,02
10	R 454B	7,05	4,42	-2,3	2,76
11	R1270	5,76	4,67	-0,5	2,61
12	R290	4,61	4,61	-0,9	2,64
13	R 744	36,23	4,96	1,5	2,45
14	R469A	15,96	3,61	-8,7	3,38

Die Verflüssigung des Tieftemperaturkreislaufes findet in einem sogenannten Dampfumformer oder Kaskadenwärmeübertrager statt. Die Besonderheit von dieser Art Wärmeübertrager ist, dass auf beiden Übertragerseiten ein phasenwechselndes Medium zirkuliert, was mit einer beidseitig konstanten Temperatur einhergeht. Der Wärmeübergang beim Sieden und Kondensieren ist im Verhältnis zu flüssigen oder gasförmigen Medien relativ groß. In der Tabelle 3.3.2 sind die typischen Größenordnungen von Wärmeübergangskoeffizienten dargestellt[18].

[18] Praxis der Wärmeübertragung S 21

Tabelle 3.3.2: Größenordnungen von Wärmeübergangskoeffizienten		
Art des Wärmeübergangs	Medium	Wärmeübergangskoeffizient [W/(m^2*K)]
freie Konvektion	Gase	3…20
	Wasser	100…600
erzwungene Konvektion	Gase	10…100
	Wasser	500…10 000
Phasenübergang	siedendes Wasser	2000…25 000
	kondensierender Dampf	5 000…100 000

Die Temperaturdifferenz zwischen der Niedertemperaturverflüssigung und der Hochtemperaturverdampfung ist folglich relativ gering. Zu berücksichtigen sind die notwendigen Temperaturdifferenzen zum Unterkühlen der Flüssigkeit der Niederdruckstufe und Überhitzen des Sauggases der Hochdruckstufe. Für die nachfolgenden Berechnungen wird im Dampfumformer eine Temperaturdifferenz von 5 K zwischen Hoch- und Tieftemperaturkreislauf angenommen. Dabei entspricht die Verdampfungstemperatur der Hochtemperaturstufe den berechneten Werten aus Tabelle 3.3.2, die Verflüssigungstemperatur der ersten Stufe liegt demnach um 5 K über diesen Werten. Das Druckverhältnis des Tieftemperaturkreislaufes fällt in diesem Berechnungsmodell demnach etwas größer aus als jenes der Hochtemperaturstufe. Diese Modifikation wurde bewusst gewählt, da bei geringeren Temperaturdifferenzen ein besserer COP-Wert zu erwarten ist. Da im Hochtemperaturkreislauf der höhere Kältemittelmassenstrom bei gleichen Kältemitteln zu erwarten wäre und damit der höhere energetische Aufwand (Abbildung 19), ist es sinnvoll die günstigeren Prozessbedingungen dorthin zu verlagern.

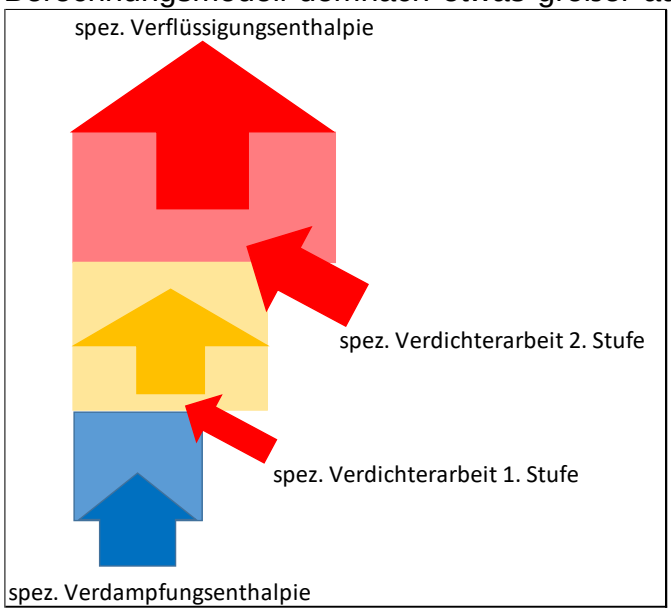


Abbildung 19: Energieflussdiagramm Kaskade

Die Kreislaufbedingungen am Verdampfer der 1. Stufe haben sich im Vergleich zu den Berechnungen in Kapitel 3.1. und 3.2. nicht verändert.

Verdampfungstemperatur	t_0 = -27 °C
Sauggasüberhitzung am VDA Ausgang	Δt_{0h} = 6 K
Druckabfall der Saugleitung	= 2 K
Temperatur am Ansaugstutzen des VDI	t_{V1} = 0°C
Wirkungsgrad des Verdichters	= 55 %

In der Abbildung 20 sind die berechneten COP-Werte der ersten Stufe der Kaskade (Anhang 15) abgebildet.

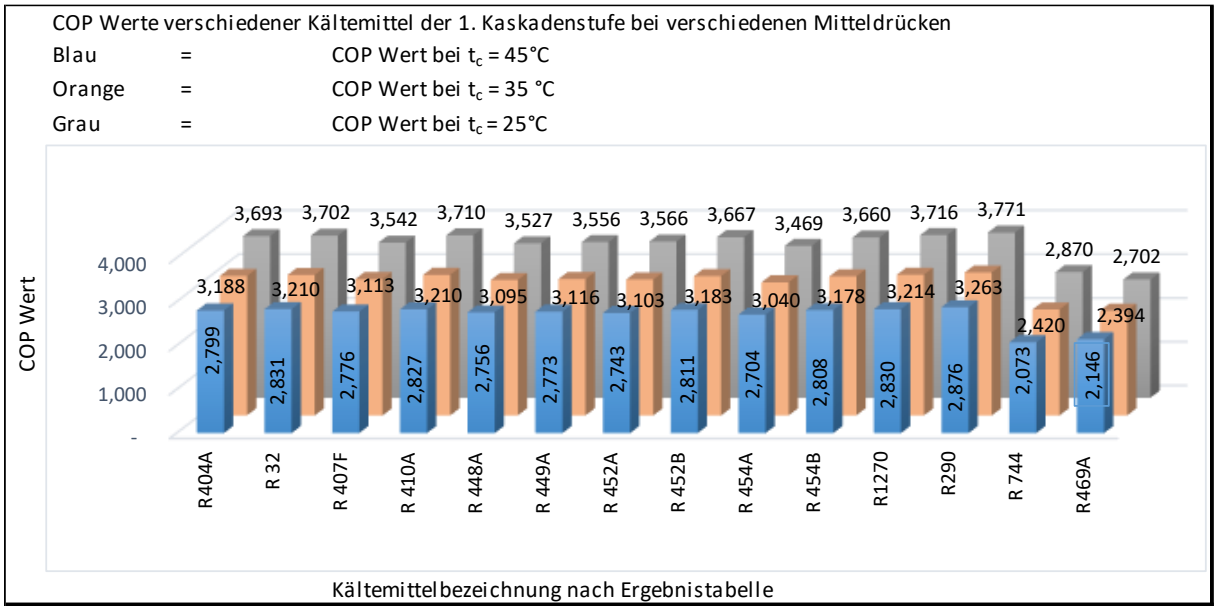


Abbildung 20: COP Werte Niedertemperaturkreislauf

Durch das geringe Druckverhältnis sind sämtliche COP-Werte höher als jene der Berechnungen aus Kapitel 3.1. und 3.2. Über den gesamten Kaskadenkreislauf kann allerdings keine Aussage getroffen werden da, die spezifische Verdichtungsarbeit des Hochtemperaturkreislaufes fehlt, dennoch können die verschiedenen Kältemittel untereinander hinsichtlich ihrer energetischen Effizienz verglichen werden. Im Vergleich mit den anderen Kältemitteln hat sich R404A in energetischer Hinsicht verbessert. Von den übrigen Kältemitteln kristallisieren sich wieder die gleichen Kältemittel, wie schon in Kapitel 3.2. und 3.1., durch ihre höhere energetische Effizienz heraus. Eine Auflistung dieser Kältemittel befindet sich in Tabelle 3.3.3. Hinzuzufügen wäre noch, dass sich die Unterschiede zwischen den COP-Werten im Vergleich zu

den bisherigen Betrachtungen relativiert haben (mit der Ausnahme von R744 und R469A)

Tabelle 3.3.3 Kältemittel mit der höchsten energetischen Effizienz				
Nr.	Kältemittel	COP t_c = 45°C	COP t_c = 35°C	COP t_c = 25°C
1	R 404A	2,799	3,188	3,693
2	R32	2,831	3,210	3,702
4	R410A	2,827	3,210	3,710
8	R452B	2,811	3,183	3,667
10	R454B	2,808	3,178	3,660
11	R1270	2,830	3,214	3,716
12	R290	2,876	3,263	3,771

Zur energetischen Bewertung der gesamten Kaskade wird nun noch der COP-Wert des Hochtemperaturkreislaufes berechnet. Da der spezifische Massenstrom von 1 kg/s wieder für den Tieftemperaturkreislauf gilt, wird wieder über die unterschiedlichen spezifischen Enthalpien des Mitteldruckes ein Faktor zur Berechnung der korrigierten spezifischen Verdichtungsarbeit gebildet. Bei den Berechnungen der Enthalpien und Verdichtungsendtemperaturen wird der Verdichterwirkungsgrad wieder zu Vergleichszwecken mit 55 % angenommen. Die Sauggasüberhitzung wird mit 4 K angenommen. Einflüsse von Druckabfällen in der Saugleitung sowie einer Erwärmung des Sauggases werden als vernachlässigbar klein eingestuft, da in diesem Falle von kurzen Rohrwegen ausgegangen wird.
Weil die Sauggasüberhitzung der zweiten Stufe nur 4 K beträgt, ist es erforderlich bei der Verwendung von R290 die Sauggasüberhitzung künstlich anzuheben. In einem Onlinedokument (Anhang 16) des Verdichterhersteller Bitzer werden explizite Werte von 20 K bei der Verwendung von Hubkolbenverdichtern vorgeschrieben.

In den Berechnungen der zweiten Stufe der Kaskade wird deshalb zusätzlich ein innerer Wärmeübertrager einkalkuliert. Dieses Bauteil überhitzt das Sauggas und nimmt die dafür erforderliche Wärme aus der Flüssigkeitsleitung desselben Kältekreislaufes. Dadurch steigt die spezifische Verdampfungsenthalpie der zweiten Stufe und der spezifische Kältemittelmassenstrom wird geringer. Durch die Erhöhung der Sauggasüberhitzung steigt aber auch die spezifische Ansaugentropie des Kältemittels. Ob sich eine Verbesserung des COP-Wertes ergibt, kann also nicht pauschal vorhergesagt werden.

In der Tabelle 3.3.4 wurde die prozentuale Veränderung des COP-Wertes für die zweite Kaskadenstufe, bei Verwendung eines inneren Wärmeübertragers, aufgelistet (Berechnung siehe Anhang 15). Unter Berücksichtigung der verschiedenen Mitteldrücke, die sich je nach verwendetem Niedertemperaturkältemittel ändern, ergeben sich bei den Berechnungen zur zweiten Kaskadenstufe, je nach Anwendungsfall, verschiedene Ergebnisse. Aus diesem Grund gibt es auch bei den Berechnungen der zweiten Kaskadenstufe und der Gesamtkaskade jeweils 14 verschiedene Ergebnispaare mit jeweils drei verschiedenen Verflüssigungstemperaturen. Aus den berechneten Werten geht hervor, dass der COP-Wert der zweiten Stufe, bei Anwendung eines inneren Wärmeübertragers, in jedem Fall eine Verbesserung erfährt.

Tabelle 3.3.4: Veränderung der COP Werte der zweiten Stufe bei Einsatz eines inneren Wärmeübertragers

Nr	Kältemittel	bei t_c = 45 °C	bei t_c = 35 °C	bei t_c = 25 °C
1	R404A	101,8	101,1	100,5
2	R 32	101,8	101,1	100,5
3	R 407F	101,9	101,2	100,6
4	R 410A	101,8	101,1	100,5
5	R 448A	101,9	101,2	100,6
6	R 449A	101,9	101,2	100,6
7	R 452A	101,8	101,1	100,6
8	R 452B	101,8	101,1	100,5
9	R 454A	101,9	101,2	100,6
10	R 454B	101,8	101,1	100,5
11	R1270	101,7	101,1	100,5
12	R290	101,7	101,1	100,5
13	R 744	101,7	101,0	100,5
14	R469A	102,0	101,2	100,7

Die Gesamt-COP Werte aus der Kaskadenberechnung (Anhang 15) sind in der Abbildung 21 dargestellt.

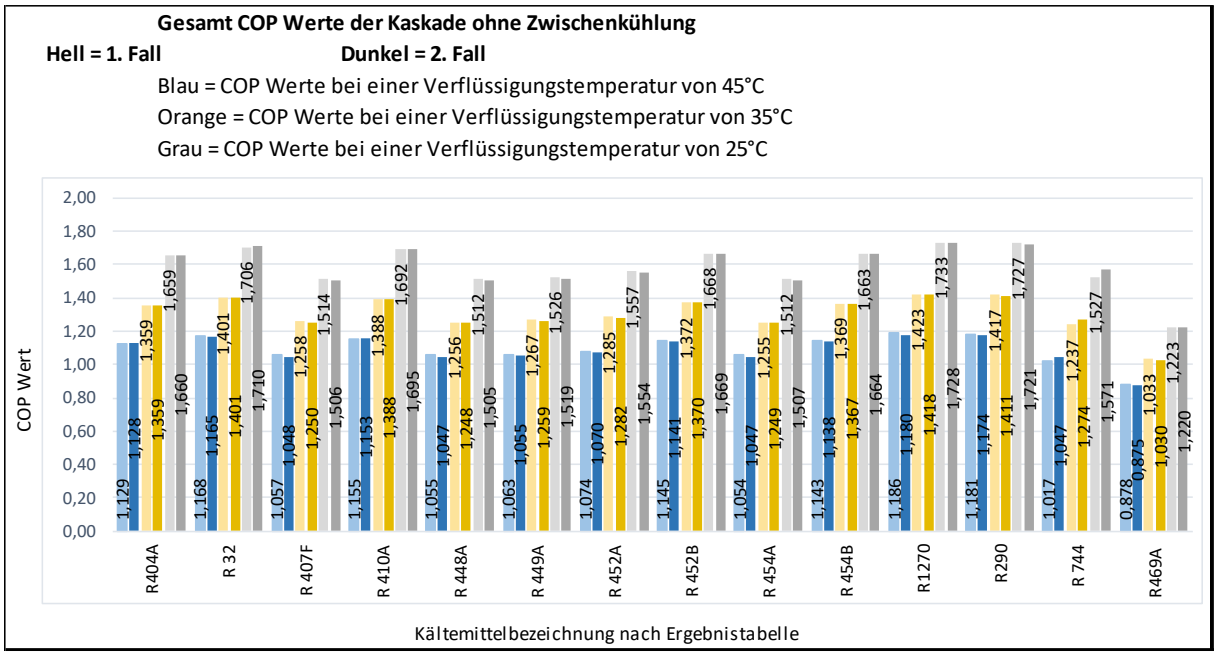


Abbildung 21: Gesamt-COP-Werte Kaskadenberechnung 1.Fall und 2. Fall

Des Weiteren wurden zum Vergleich die COP-Werte aus einer alternativen Kaskadenberechnung (Anhang 17) mit in die Abbildung integriert. Die verschiedenen Farben stellen dabei unterschiedliche Verflüssigungstemperarturen dar. Der Gesamt-COP-Wert der Kaskade wurde für zwei Auslegungsfälle berechnet:

1. **Fall** → hellerer Farbton

   Der Hochtemperaturkreislauf der Kaskade verdampft bei der berechneten Mitteldrucktemperatur (Anhang 15). Der Tieftemperaturkreislauf verflüssigt 5 K über der Mitteldrucktemperatur, dadurch arbeitet der Tieftemperaturkreislauf mit dem höheren Druckverhältnis.

2. **Fall** → dunklerer Farbton

   Der Tieftemperaturkreislauf der Kaskade verflüssigt bei der berechneten Mitteldrucktemperatur. Der Hochtemperaturkreislauf verdampft 5 K unter der Mitteldrucktemperatur, dadurch arbeitet der Hochtemperaturkreislauf mit dem höheren Druckverhältnis.

Im ersten Schritt, bei der Berechnung der COP-Werte der Tieftemperaturstufe, wurde vermutet, dass der erste Fall die höhere energetische Effizienz für die Gesamtkaskade liefert. In der Abbildung 21 zeigt sich, dass die COP-Werte im 1. Fall für die meisten berechneten Kältemittel höher waren als im 2. Fall. Eine der Ausnahmen stellt R744 dar, bei jeder betrachteten Verflüssigungstemperatur war der COP-Wert beim 2. Fall besser. Bei einigen weiteren Kältemitteln war der COP-Wert im 2. Fall nur bei der geringen Verflüssigung von 25 °C besser.

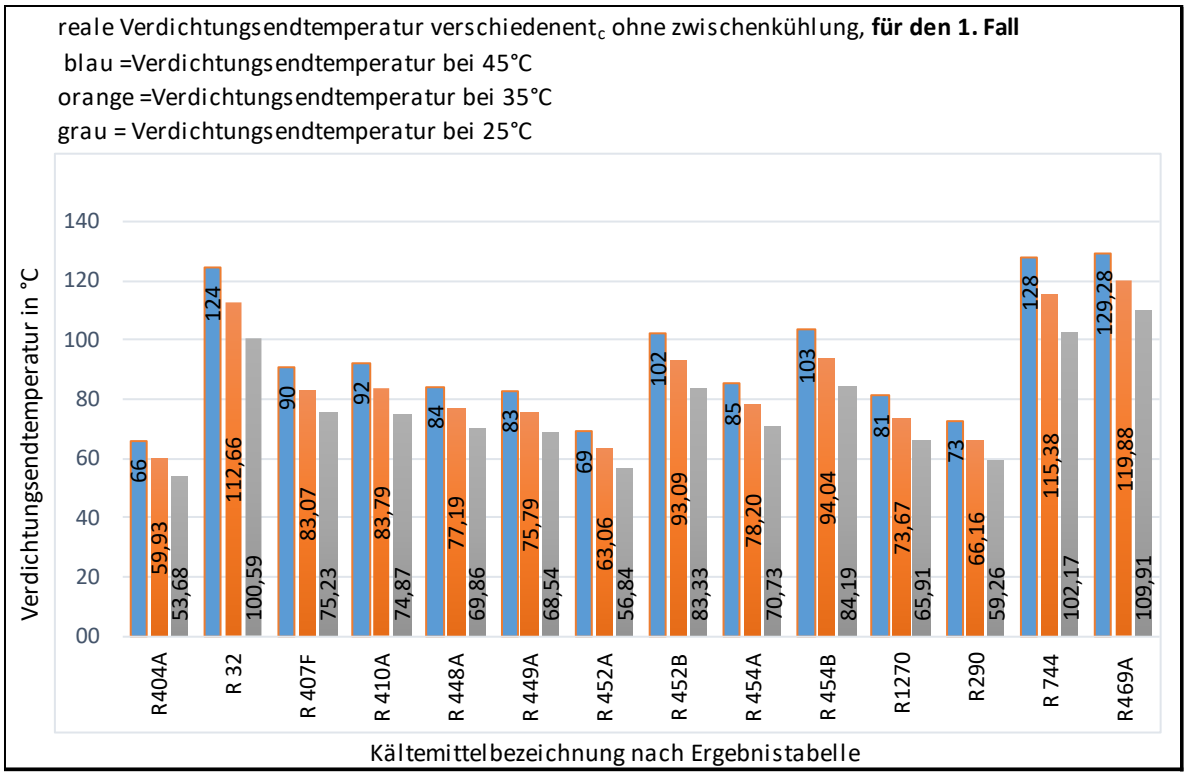


Abbildung 22: Heißgastemperaturen der Kaskade im 1. Fall

In der Abbildung 22 sind die realen Verdichtungsendtemperaturen der einzelnen Kältemittel bei den unterschiedlichen Mitteldrücken (je nach Verflüssigungstemperatur) für den 1. Fall abgebildet. Die Verdichtungsendtemperaturen können, wie in Kapitel 3.2, mit einem Wärmeübertrager zwischengekühlt werden. Die Austrittstemperatur des Heißgases am Zwischenkühler der ersten Stufe wird wieder mit der Kältemittelaustrittstemperatur am Verflüssiger der zweiten Stufe gleichgesetzt. Durch die Zwischenkühlung wird die spezifische Verflüssigungsenthalpie der ersten Stufe geringer und dadurch auch der spezifische Massenstrom der zweiten Stufe. Insgesamt wird die spezifische Verdichtungsarbeit der zweiten Stufe geringer und dadurch der COP-Wert höher. Die berechneten COP-Werte (Anhang 15) sind in Abbildung 23 dargestellt.

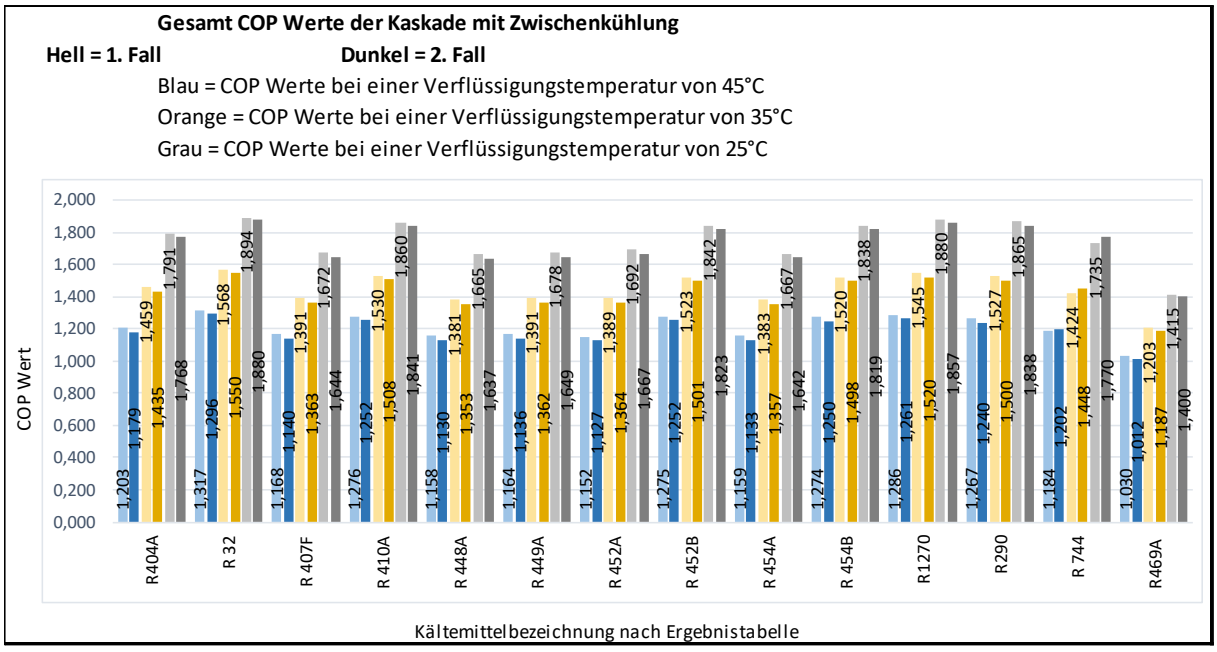


Abbildung 23: COP Werte der Kaskade mit Zwischenkühlung, für den 1. und den 2. Fall

Wie bereits bei der Berechnung ohne Zwischenkühlung sind die COP-Werte für den 1. Fall (hellerer Farbton) leicht höher als die des 2. Falles. Das Kältemittel R744 stellt dabei erneut eine Ausnahme dar. Wie erwartet sind alle COP-Werte im Vergleich zur Berechnung ohne Zwischenkühlung, angestiegen. Hinsichtlich der energetischen Effizienz konnten sich die bereits genannten Favoriten abermals behaupten. Erwähnenswert ist eine überproportionale Verbesserung des COP Wertes von R744.

Durch die erforderliche Temperaturdifferenz des Kaskadenwärmeübertragers stellen sich, auf den Gesamtprozess bezogen, Verluste ein. Im 1. Fall wurde die Temperaturdifferenz der Kaskade so gewählt, dass der Verdichter des Tieftemperaturkreislauf das höhere Druckverhältnis überwinden muss, daraus ergibt sich eine geringere energetische Effizienz. Im Idealfall wäre die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Kreisläufen 0 K was technisch nicht realisierbar ist. In der Tabelle 3.3.5 wurde die Entwicklung der Gesamt-COP-Werte der Kaskade mit Zwischenkühlung für den 1. Fall dargestellt bei einer Temperaturdifferenz an der Kaskade von 2 K.

Tabelle 3.3.5 prozentuale Änderung der COP Werte bei Absenkung der Temperaturdifferenz des Kaskadenwärmeübertragers von 5 auf 2 K				
Nr.	Kältemittel	bei t_c 45°C	bei t_c 35°C	bei t_c 25°C
1	R404A	104,6	105,2	106,0
2	R 32	104,5	105,2	106,1
3	R 407F	104,0	104,6	105,3
4	R 410A	104,5	105,2	106,1
5	R 448A	104,0	104,6	105,4
6	R 449A	104,1	104,6	105,4
7	R 452A	104,3	104,9	105,7
8	R 452B	104,4	105,1	106,0
9	R 454A	104,1	104,7	105,4
10	R 454B	104,4	105,1	105,9
11	R1270	104,5	105,1	106,0
12	R290	104,4	105,1	106,0
13	R 744	105,9	106,4	107,2
14	R469A	103,8	104,2	104,8

Die Werte aus der Tabelle stammen aus der Berechnung im Anhang 15 und bestätigen, dass sich bei geringerer Temperarturdifferenz am Kaskadenwärmeübertrager eine Verbesserung der Gesamt-COP-Werte einstellt.

3.4. Zusammenfassung zur energetischen Effizienz

Die Untersuchung der energetischen Effizienz hat folgende Resultate erbracht:

Der einstufige Kreislauf hat aus energetischer Hinsicht die schlechtesten COP-Werte und als Folge des einstufigen Prozessablaufes im Allgemeinen eine hohe Verdichtungsendtemperatur. Die Höhe dieser Temperatur variiert je nach Kältemittel. Die prozentualen Unterschiede der COP-Werte sind in Tabelle 3.4.1 dargestellt. Hinsichtlich der Heißgastemperaturen sind aufgrund der hier gestellten Anforderungen nur drei Kältemittel einsetzbar: R404A, R290 und R452A. Aufgrund des hohen GWP-Wertes entfällt das Kältemittel R404A. Bei der Berechnung der ökologischen Effizienz werden dennoch alle Kältemittel des einstufigen Prozesses betrachtet, da die Einsatzbedingungen abweichend von diesen Berechnungen sein könnten.

Tabelle 3.4.1 prozentualer Vergleich der COP Werte des ein und zweistufigen Prozesses

Bei verschiedenen Verflüssigungstemperaturen, Bezugs- COP Wert = R404A

		Einstufiger Prozess			Zweistufiger Prozess mit ZK		
Nr.	Kältemittel	t_c = 45 °C	t_c = 35 °C	t_c = 25 °C	t_c = 45 °C	t_c = 35 °C	t_c = 25 °C
1	R404A	100	100	100	100	100	100
2	R 32	117,0	110,1	105,9	115,63	111,1	107,92
3	R 407F	105,1	99,3	94,9	103,82	99,67	96,084
4	R 410A	110,4	106,5	104,1	109,02	106,7	104,95
5	R 448A	102,9	98,0	94,2	102	98,42	95,264
6	R 449A	103,5	98,7	95,1	102,46	99,02	96,012
7	R 452A	96,2	95,1	94,0	97,3	96,24	95,095
8	R 452B	112,9	107,2	103,5	111,02	107,3	104,58
9	R 454A	102,0	97,3	93,6	101,31	97,86	94,826
10	R 454B	113,1	107,2	103,4	111,14	107,3	104,43
11	R1270	118,0	113,0	109,8	112,6	109,5	107,36
12	R290	118,7	113,2	109,8	111,55	108,5	106,57
13	R 744	66,0	68,0	76,3	71,965	77,33	86,096
14	R469A	76,0	74,4	71,8	100,48	97,69	93,386

Der zweistufige Prozess zeichnete sich durch höhere COP-Werte aus. Die Erhöhung der COP-Werte ist auf die Abkühlung des Heißgases der ersten Stufen in der Mitteldruckflasche zurückzuführen. Durch die Abkühlung sinkt die Ansaugentropie und dadurch die spezifische Verdichtungsarbeit. Eine weitere Verbesserung stellte sich durch die Zwischenkühlung des Heißgases ein. Die Heißgastemperaturen waren deutlich geringer als im einstufigen Kreislauf und alle Kältemittel wären hinsichtlich dieses Kriteriums einsetzbar. Die prozentualen Unterschiede zum COP-Wert von R404A bei der Zwischenkühlung des Heißgases der ersten Stufe sind ebenfalls in der Tabelle 3.4.1 dargestellt. In der Berechnung der ökologischen Effizienz werden die COP-Werte des zweistufigen Kreises mit Zwischenkühlung betrachtet, da diese besser sind.

Tabelle 3.4.2 prozentualer Vergleich der gesamt COP Werte der Kaskade mit Zwischenkühlung im 1. Fall

	2. Stufe der Kaskade Kältemittel = R290	Prozentualer Vergleich der COP Werte der Kaskadenschaltung mit Zwischenkühlung			
Nr.	Kältemittel der 1. Stufe	t_c = 45 °C	t_c = 35 °C	t_c = 25 °C	
1	R404A =Bezugskältemittel	100	100	100	
2	R 32	109,5	107,5	105,7	
3	R 407F	97,1	95,3	93,4	
4	R 410A	106,1	104,9	103,8	
5	R 448A	96,2	94,7	92,9	
6	R 449A	96,8	95,3	93,7	
7	R 452A	95,8	95,2	94,5	
8	R 452B	106,0	104,4	102,8	
9	R 454A	96,4	94,8	93,1	
10	R 454B	105,9	104,2	102,6	
11	R1270	106,9	105,9	105,0	
12	R290	105,3	104,7	104,1	
13	R 744	98,4*	97,6*	96,9*	
14	R469A	85,6	82,5	79,0	

Der Kaskadenkältekreislauf hatte ebenfalls höhere COP-Werte als der einstufige Kreislauf, jedoch geringere als der zweistufige Kreislauf. Ursache dafür ist der Verlust über den Kaskadenwärmeübertrager. Auf der Hochtemperaturseite wurde nur das Kältemittel R290 betrachtet. Auf der Niederdruckseite wurde mit allen zuvor ermittelten Kältemitteln gerechnet. Auch in diesem Berechnungsmodell waren die COP-Werte mit Zwischenkühlung höher. Die prozentualen Unterschiede der COP-Werte mit Zwischenkühlung wurden in Tabelle 3.4.2 dargestellt. Als Vergleich dient die R290/R404A Kaskade. Der berechnete Mitteldruck der Kaskade wurde jeweils auf einen Kreis angewendet, der andere Kreislauf wurde um die erforderliche Temperaturdifferenz der Kaskade (5 K) entsprechend verschoben, dabei wurde in erster Instanz der Propan-Kreis mit den günstigen Betriebsbedingungen berechnet, da hier nach der Logik des Energieflussdiagrammes der größere Energiefluss anliegt und es einen positiven Einfluss auf den COP-Wert haben sollte. Bei der Alternativrechnung (2. Fall) stellte sich heraus, dass dies auch bei jedem Kältemittel außer R744 der Fall war. Zum Vergleich sind die COP-Werte der R744/R290 Kaskade für beide Fälle in der Tabelle 3.4.3 gegenübergestellt.

Tabelle 3.4.3 COP Werte der R290/R744 Kaskade im Vergleich

R290/R744 Kaskade	COP Wert mit ZK bei t_c = 45 °C	COP Wert mit ZK bei t_c = 35 °C	COP Wert mit ZK bei t_c = 25 °C
1. Fall	1,184	1,424	1,735
2. Fall	1,202	1,448	1,770

Bei der Berechnung der ökologischen Effizienz werden die COP Werte des 1. Falls genutzt, mit Ausnahme von R 744 wo die COP Werte des 2. Falls genutzt werden.

Abschließend zu diesem Kapitel sind in der Tabelle 3.4.4 die COP-Werte bei einer Verflüssigungstemperatur von 35 °C für alle betrachteten Fälle aufgeführt. Nach energetischen Kriterien betrachtet hat der zweistufige Kreislauf mit Zwischenkühlung in den meisten berechneten Fällen die höchste Effizienz.

Tabelle 3.4.4 COP Werte bei einer Verflüssigung von 35 °C aus Verschiedenen Berechnungsmodellen im Vergleich

Nr	KM	1-stufig	R290 Kaskade ohne IWÜ	R290 Kaskade mit IWÜ	2-stufig	R290 Kaskade mit IWÜ und ZK 2. Fall	R290 Kaskade mit IWÜ und ZK 1. Fall	2-stufig mit ZK
1	R404A	1,24	1,35	1,36	1,43	1,44	1,46	1,51
2	R 32	1,36	1,39	1,40	1,52	1,55	1,57	1,68
3	R 407F	1,23	1,25	1,26	1,38	1,36	1,39	1,50
4	R 410A	1,32	1,38	1,39	1,48	1,51	1,53	1,61
5	R 448A	1,21	1,25	1,26	1,37	1,35	1,38	1,48
6	R 449A	1,22	1,26	1,27	1,38	1,36	1,39	1,49
7	R 452A	1,18	1,28	1,29	1,36	1,36	1,39	1,45
8	R 452B	1,33	1,36	1,37	1,48	1,50	1,52	1,62
9	R 454A	1,20	1,25	1,26	1,36	1,36	1,38	1,48
10	R 454B	1,33	1,36	1,37	1,48	1,50	1,52	1,62
11	R1270	1,40	1,41	1,42	1,55	1,52	1,54	1,65
12	R290	1,40	1,41	1,42	1,54	1,50	1,53	1,64
13	R 744	0,84	1,23	1,24	1,00	1,45	1,42	1,17
14	R469A	0,92	1,03	1,03	1,30	1,19	1,20	1,47

4. Vergleich hinsichtlich ökologischer Faktoren und Auswertung

In diesem Kapitel werden die ermittelten Kältemittel in den verschiedenen Anwendungsfällen hinsichtlich ihrer ökologischen Effizienz bewertet. Die zuvor berechneten COP-Werte dienen dazu als Grundlage. Zur Bewertung dient der TEWI-Ansatz (Total Equivalent Warming Impact). Dieser wird mi folgender Formel berechnet:
$TEWI = (GWP \times L \times n) + (GWP \times m(1-\alpha_{recovery}) + (n \times E_{Annual} \times \beta)$.
Die Summe des TEWI-Wertes wird aus drei Anteilen gebildet:
1. Leckageanteil: GWP X L X n
2. Recyclingsverluste: $GWP \times m(1-\alpha_{recovery})$
3. Emissionen durch Energieverbrauch: $n \times E_{Annual} \times \beta$

Zur Berechnung des Wertes müssen einige Annahmen getroffen werden und einige Werte über die berechnete Kälteanlage bekannt sein.

GWP	= GWP-Wert des Kältemittels	($kg_{CO2}/kg_{Kältemittel}$)
L	= Leckrate pro Jahr	(kg)
n	= Betriebszeit der Anlage	(Jahre)
m	= Kältemittelfüllmenge	(kg)
$\alpha_{recovery}$	= Recyclingsfaktor der Kältemittelmenge	(0……1)
E_{Annual}	= Jahresenergiebedarf	(kWh)
β	= CO_2 Emissionen pro kWh	(kg_{CO2}/kWh)

Leckrate	3,83 % der Gesamtfüllmenge pro Jahr[19] (Anhang 18)
Anlagenbetriebszeit	15 Jahre (Annahme)
Recyclingsfaktor	0,1 (Annahme)
CO_2 Emissionen pro kWh	0,411 kg/kWh (Energiemix DE 2019[20])

Zur Berechnung des Energieverbrauches sind weitere Annahmen notwendig:
Kälteleistung des Kühlraumes: Für die Berechnungen zur ökologischen Effizienz wird eine Kälteleistung von 5 kW für den Kühlraum angenommen. Die Leistung ist dabei ganzjährig konstant.
Die tägliche Anlagenlaufzeit: In der Fachlektüre[21] wird auf eine tägliche Laufzeit von 16 - 18 Stunden pro Tag, beim Auslegen einer Kühlzelle hingewiesen. Basierend auf dieser Vorgabe, geht die tägliche Laufzeit der Kälteanlage mit 18 Stunden in die Berechnung mit ein. Diese Laufzeit ist dabei auf den Sommerauslegungsfall bezogen, bei einer Verflüssigungstemperatur von 45 °C.

[19] TGA Fachplaner
[20] Umweltbundesamt
[21] Kältetechnik, Ullrich, Band II, S. 32

Da die Anlagenlaufzeit 18 Stunden am Tag beträgt, wird die erforderliche Kälteleistung entsprechend höher. Bei 5 kW würde die Leistung der Maschine wie folgt berechnet:

$$Q_{KM} = \frac{Q_0 * 24h}{Anlagenlaufzeit}$$

Im Fall von 5 kW Q_0 (Kühlraumkälteleistung) wäre die Maschinenleistung dann:

$$Q_{KM} = \frac{5kW * 24h}{18h} = 6{,}67 \text{ kW}.$$

Die erforderliche Antriebsleitung wurde nach dem COP-Wert berechnet, bei einem COP von 2 wäre die Verdichterleistung dann:

$P_{el} = Q_{KM}/COP = 3{,}33$ kW.

Bei sinkenden Verflüssigungstemperaturen steigen die COP-Werte der Anlage und die Laufzeit der Anlage wird geringer. Bei einem COP-Wert von 4 wäre die Laufzeit der Anlage nur halb so hoch wie bei einem COP-Wert von 2. Den ökologischen Betrachtungen werden als Berechnungsansatz ungeregelte Verdichter zugrunde gelegt. Der COP-Wert hat also nur Einfluss auf die tägliche Anlagenlaufzeit und somit nur indirekt auf den Energiebedarf. Für die Berechnungen des Energiebedarfes werden mithilfe der COP-Werte Faktoren für die Anlagenlaufzeit (f_t) berechnet.

Beispiel: $COP_{tc\ 45°C} = 1$

$COP_{ist} = 2$

Faktor Anlagenlaufzeit $f_t = \frac{COP_{45°C}}{COP_{ist}} = 0{,}5$

Bei der Berechnung des jährlichen Energiebedarfes werden drei Betriebszustände betrachtet:

1. Verflüssigungstemperatur 40°C
2. Verflüssigungstemperatur 30 °C
3. Verflüssigungstemperatur 20 °C

Dabei werden den Betriebszuständen folgende Außentemperaturen zugeordnet

1. Außentemperatur über 20°C
2. Außentemperatur zwischen 5°C und 20 °C
3. Außentemperatur unter 5 °C

Als minimale Verflüssigungstemperatur des Kältekreislaufes wird in den folgenden Berechnungen eine Verflüssigungstemperatur von 20 °C betrachtet. In der einstufigen und zweistufigen Prozessberechnung wurden für das Kältemittel R744, passend zur angepassten Verflüssigungstemperatur, neue optimale Hochdrücke ermittelt (Anhang 7). Im Anhang 19 wurden Daten des DWD[22] ausgewertet, welche die stündlichen Temperaturen des Jahres 2021 der DWD-Station Potsdam enthielten. Den Temperaturbereichen wurden die Stunden entsprechend zugeordnet.

1. jährliche Stunden über 20°C = 1057 h
2. jährliche Stunden zwischen 5 °C und 20 °C = 4963 h

[22] DWD

3. jährliche Stunden unter 5°C = 2740 h

In der Berechnung zur ökologischen Effizienz wird mithilfe dieser ermittelten Werte, unter Berücksichtigung des Betriebsstundenfaktors, der Energiebedarf der Anlage berechnet. Als Beispiel für den 3. Betriebszustand würden sich die Betriebsstunden zunächst um 18/24 reduzieren, da die Anlage mit ihrer Leistung nur 18 Stunden pro Tag läuft. Im zweiten Zuge werden die Betriebsstunden mit dem gebildeten Faktor der COP-Werte weiter reduziert, wie im folgenden Beispiel berechnet.

Betriebsstunden zu 3.

=2740 h

Reduzierung bei täglicher Betriebszeit von 18 h/Tag

2740 * (18/24) =2055 h

Reduzierung durch COP-Wert (bei $COP_{45°C}$=1 und COP_{ist}=2)

2055* $COP_{45°C}/COP_{ist}$ = 2055* (½) =1027,5 h

Mit den Beispielbedingungen würde die Kälteanlage bei kälteren Außentemperaturen nicht mehr 18 h pro Tag, sondern nur noch 9 h pro Tag laufen.

Zur Kältemittelfüllmenge gab es bereits im Kapitel 2.3. eine Berechnung der Füllmengen nach Anlagenleistung. Da in dieser Berechnung kein zutreffender Füllmengenfaktor ermittelt werden konnte, werden die Berechnungen mit fünf verschiedenen leistungsabhängigen Füllmengenfaktoren betrachtet.

1. Füllmengenfaktor= 0,25 kg/kW_{Q0}
2. Füllmengenfaktor= 0,5 kg/kW_{Q0}
3. Füllmengenfaktor= 1 kg/kW_{Q0}
4. Füllmengenfaktor= 2 kg/kW_{Q0}
5. Füllmengenfaktor= 4 kg/kW_{Q0}

Dementsprechend wird es pro betrachteter Anlagenvariante fünf TEWI-Werte als Ergebnis geben.

4.1. Einstufiger Prozess

Die Ergebnisse der Berechnungen zur ökologischen Effizienz des einstufigen Prozesses (Anhang 20) sind in der Tabelle 4.1.1 abgebildet.

Tabelle 4.1.1 ökologische Effizienz des einstufigen Kältekreislaufes									
					Gesamt TEWI in $kg_{CO2Äq.}$ nach Füllmengenfaktor				
Nr.	Kälte-mittel	GWP Wert	Energie-bedarf kWh/Y	TEWI Energie-bedarf	0,25 kg pro KW Q_0	0,5 kg pro KW Q_0	1 kg pro KW Q_0	2 kg pro KW Q_0	4 kg pro KW Q_0
1	R404A	3922	29761	183474	186781	190088	196701	209928	236382
2	R 32	675	27621	170286	170855	171425	172563	174839	179392
3	R 407F	1825	30767	189679	191218	192757	195834	201989	214299
4	R 410A	2088	28304	174495	176255	178016	181537	188578	202662
5	R 448A	1387	31078	191594	192763	193933	196271	200949	210304
6	R 449A	1397	30808	189931	191109	192287	194643	199354	208777
7	R 452A	2140	31508	194246	196050	197854	201463	208680	223114
8	R 452B	698	28308	174517	175106	175694	176871	179225	183933
9	R 454A	239	31280	192844	193046	193247	193650	194456	196068
10	R 454B	467	28335	174688	175082	175476	176263	177838	180988
11	R1270	2	26765	165006	165007	165009	165012	165019	165033
12	R290	3	26730	164793	164795	164798	164803	164813	164833
13	R 744	1	41036	252989	252990	252991	252992	252996	253002
14	R469A	1357	40902	252164	253308	254452	256740	261317	270470

Aufgeführt wurden die berechneten Kältemittel mit ihrem jeweiligen GWP-Wert. Berechnet wurde der Energieverbrauch der Kälteanlage bei einer Kühlraumkälteleistung von 5 kW. Der Energiebedarf wurde gemäß den ermittelten Betriebsstunden aus den Daten des DWD, unter den in Kapitel 4. ermittelten Betriebszuständen, berechnet. Die gesamt TEWI-Werte wurden nach den entsprechenden spezifischen Füllmengen ermittelt. Der TEWI-Wert des Energieverbrauches unterscheidet sich je nach COP-Wert des Kältemittels. Der Gesamt-TEWI-Wert steigt je nach berechnetem Füllmengenfaktor an. Zur anschaulicheren Darstellung wurde die Entwicklung der TEWI-Werte in der Abbildung 24 dargestellt.

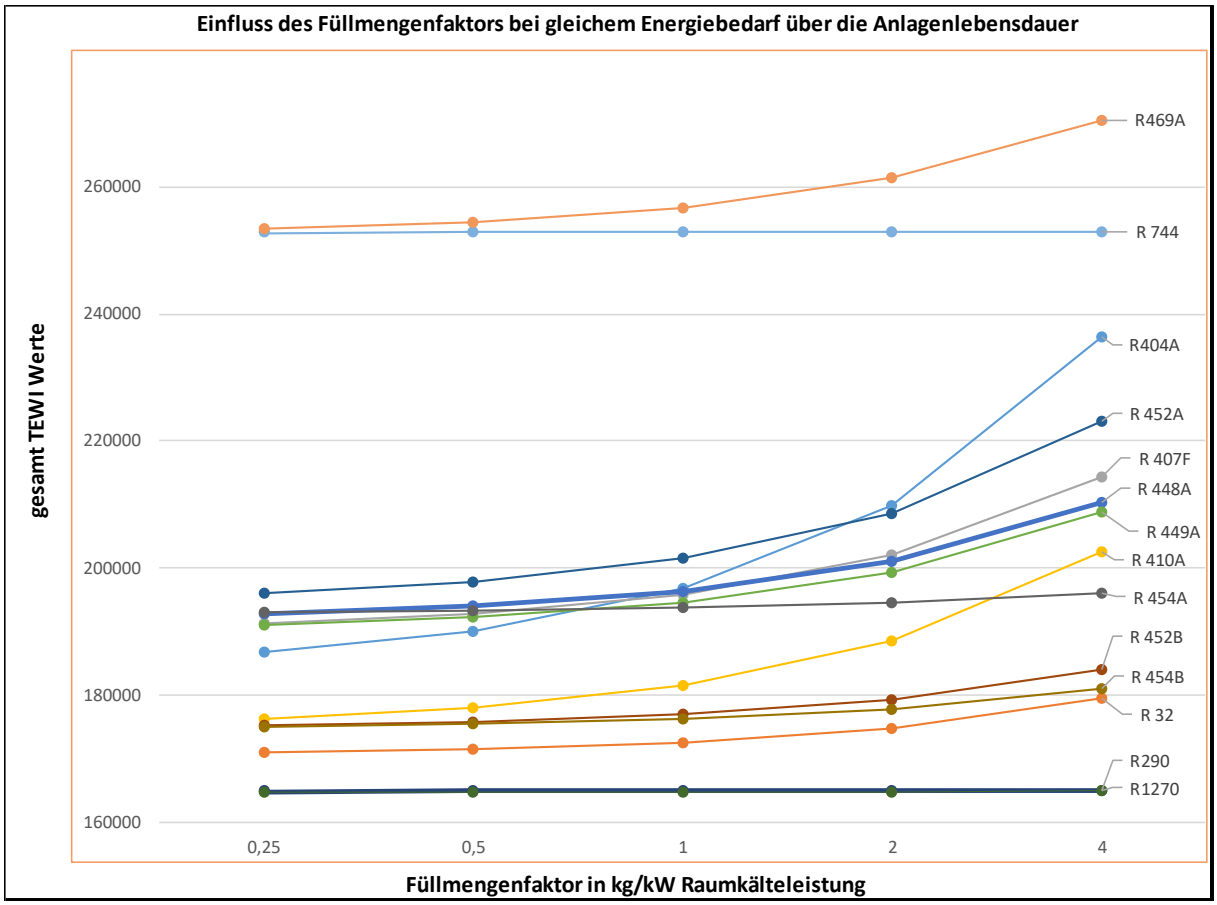


Abbildung 24: Füllmengenabhängige Veränderung der TEWI Werte des einstufigen Kreislaufes

In dieser Abbildung ist eine vergleichsweise hohe ökologische Effizienz der Kältemittel R290 und R1270 erkennbar, bei sowohl kleinen als auch großen Füllmengen. Diese Kältemittel gehören allerdings zu den brennbaren Kältemitteln der Gruppe A3. Unter den Kältemitteln der Gruppe A2L hat R32 bei allen betrachteten Füllmengen die höchste ökologische Effizienz. Das Kältemittel R410A hatte unter den Kältemitteln der Gruppe A1 den geringsten TEWI-Wert. Das Kältemittel R744 hatte, trotz des geringen GWP-Wertes, in diesem betrachteten Anwendungsfall mit R469A die höchsten TEWI Werte, aufgrund seiner schlechten energetischen Effizienz.

4.2. Zweistufiger Prozess

Für die Berechnung der ökologischen Effizienz des zweistufigen Kreislaufes wird der Wirkungsgrad der Verdichter neu ermittelt. In den vorherigen Berechnungen zur energetischen Effizienz wurde der Wirkungsgrad in sämtlichen Berechnungen mit 55% definiert, um die einzelnen Prozesse besser vergleichen zu können. Grundlage dieses ermittelten Wirkungsgrades waren einstufige Prozesse mit kompakten Verflüssigungssätzen. In Kapitel 2.1. wurde bereits darauf hingewiesen, dass der Verdichterwirkungsgrad mit steigendem Druckverhältnis geringer wird. In der zweistufigen Kälteanlage liegen an den Verdichtern geringere Druckverhältnisse an. In einer separaten Berechnung (Anhang 21) wurden verschiedene Verdichter für einen Verdichtungsvorgang mit geringeren Druckverhältnissen ausgelegt und ein Mittelwert gebildet. Das Ergebnis war ein Mittelwert von 67,42%. Auch in diesem Berechnungsmodell wird der Wert leicht nach unten korrigiert, um auftretenden Alterungserscheinungen entgegenzuwirken. Die Annahme des Wirkungsgrades beider Verdichter ist deshalb 65%. Die Ergebnisse zur Berechnung der ökologischen Effizienz (Anhang 22) unter diesen Bedingungen sind in der Tabelle 4.2.1 dargestellt.

Tabelle 4.2.1: ökologische Effizienz des zweistufigen Kältekreislaufes

					Gesamt TEWI in $kg_{CO2Äq.}$ nach Füllmengenfaktor				
Nr.	Kälte-mittel	GWP Wert	Energie-bedarf kWh	TEWI Energie-bedarf	0,25 kg pro KW Q_0	0,5 kg pro KW Q_0	1 kg pro KW Q_0	2 kg pro KW Q_0	4 kg pro KW Q_0
1	R404A	3922	21077	129940	133247	136553	143167	156394	182848
2	R 32	675	19291	118930	119499	120068	121206	123483	128036
3	R 407F	1825	21619	133279	134818	136356	139434	145588	157898
4	R 410A	2088	19946	122966	124726	126487	130008	137049	151133
5	R 448A	1387	21841	134648	135817	136987	139326	144003	153358
6	R 449A	1397	21685	133685	134863	136041	138396	143108	152530
7	R 452A	2140	22062	136014	137818	139623	143231	150448	164883
8	R 452B	698	19936	122907	123496	124084	125262	127616	132324
9	R 454A	239	21950	135324	135526	135727	136130	136936	138548
10	R 454B	467	19957	123035	123429	123822	124610	126185	129335
11	R1270	2	19468	120021	120022	120024	120027	120034	120048
12	R290	3	19623	120976	120978	120981	120986	120996	121016
13	R 744	1	25510	157267	157268	157269	157270	157274	157280
14	R469A	1357	22202	136874	138018	139162	141451	146027	155180

Durch die höheren COP-Werte des zweistufigen Prozesses und die besseren Verdichterwirkungsgrade sind die, durch Energiebedarf erzeugten, CO_2 Emissionen geringer als beim einstufigen Kreislauf. Die Entwicklungen der TEWI-Werte bei steigendem Füllmengenfaktor sind in Abbildung 25 dargestellt.

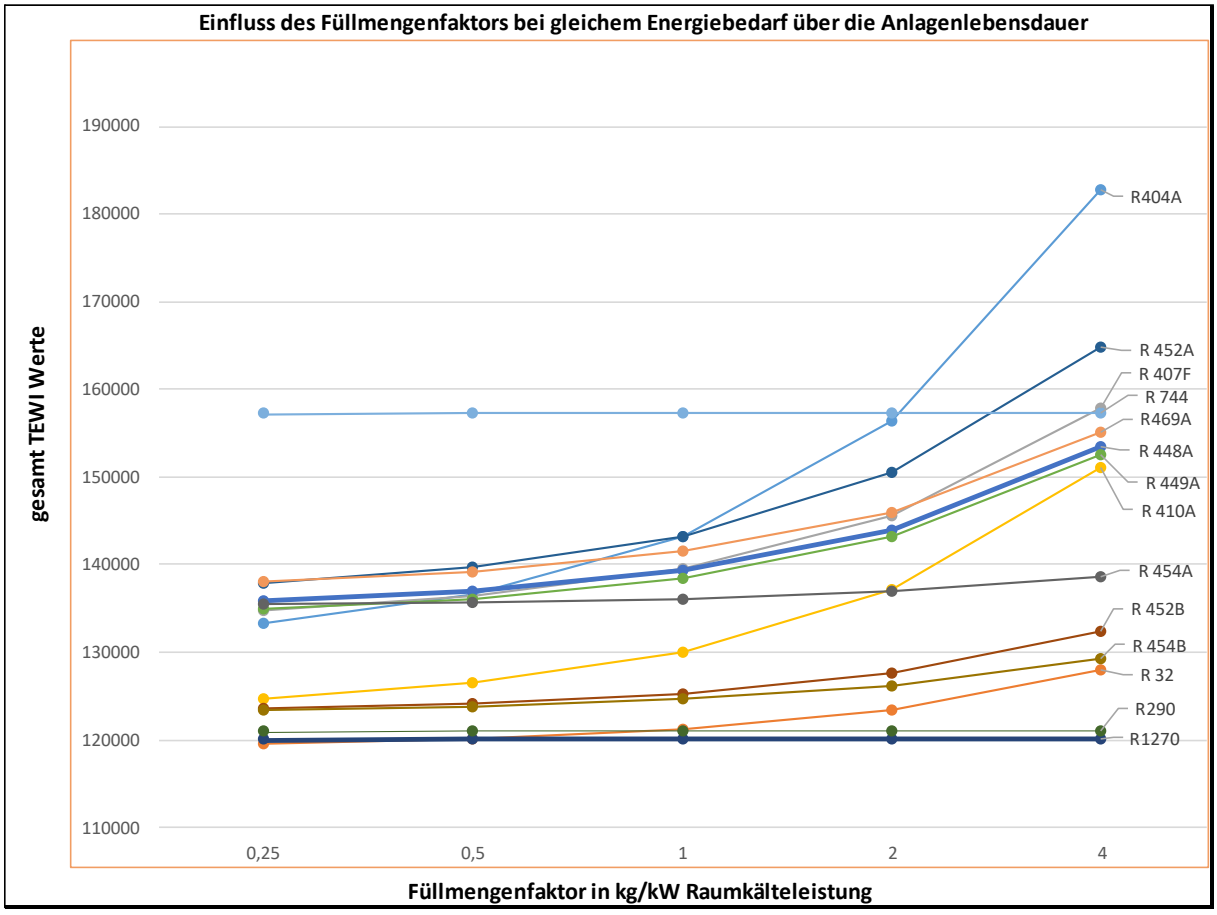


Abbildung 25: Füllmengenabhängige Veränderung der TEWI Werte des zweistufigen Kreislaufes

Da die Füllmengenfaktoren im Vergleich zu 4.1. gleichgeblieben sind, können relative Veränderungen der TEWI-Werte untereinander allein auf eine Veränderung der energetischen Effizienz zurückgeführt werden. Erwähnenswert ist eine relative Verbesserung der Kältemittel R744 und R469A, welche beim Vergleich mit den anderen Kältemitteln jetzt ähnliche TEWI-Werte aufweisen.

4.3. Kaskade

Bei den Berechnungen der Kaskade wird für den Verdichter wieder ein Wirkungsgrad von 65% betrachtet. Die COP-Werte beziehen sich auf den 1. Fall der energetischen Berechnung mit innerem Wärmeübertrager und Zwischenkühler. Die COP Werte des Kältemittels R744 stamme aus der Berechnung des 2. Falles, da diese dort höher waren. Da die Verflüssigungsdrücke der ökologischen Berechnung etwas verändert wurden, im Vergleich zur energetischen Berechnung, mussten die Mitteldrücke der Kaskade über die Mitteldruckberechnung (Anhang 15) korrigiert werden. Der Füllmengenfaktor bezieht sich auf die Kältemittelfüllmenge des Tieftemperaturkreislaufes. Die Betrachtung der Füllmenge des Hochtemperaturkreislaufes kann aus zwei Gründen in den Berechnungen vernachlässigt werden: Zum einen wird in jeder Kaskade dasselbe Hochtemperaturkältemittel verwendet, somit entfällt die Vergleichsfunktion. Zum anderen ist der GWP-Wert des verwendeten Kältemittels so gering, dass dieser bei der Gesamtbetrachtung der TEWI-Werte nicht ins Gewicht fällt. Die Ergebnisse der Kaskadenberechnung (Anhang 23) wurden in der Tabelle 4.3.1 dargestellt.

Tabelle 4.3.1: ökologische Effizienz des zweistufigen Kältekreislaufes

					Gesamt TEWI in $kg_{CO2Äq.}$ nach Füllmengenfaktor				
Nr.	Kälte-mittel	GWP Wert	Energie-bedarf kWh	TEWI Energie-bedarf	0,25 kg pro KW Q_0	0,5 kg pro KW Q_0	1 kg pro KW Q_0	2 kg pro KW Q_0	4 kg pro KW Q_0
1	R404A	3922	22194	136825	140132	143438	150052	163279	189733
2	R 32	675	20854	128564	129133	129702	130840	133117	137670
3	R 407F	1825	23587	145412	146950	148489	151566	157721	170031
4	R 410A	2088	21288	131238	132998	134758	138279	145321	159405
5	R 448A	1387	23716	146210	147380	148549	150888	155565	164921
6	R 449A	1397	23542	145135	146313	147491	149846	154558	163980
7	R 452A	2140	23423	144402	146206	148011	151619	158836	173271
8	R 452B	698	21455	132272	132861	133449	134626	136980	141688
9	R 454A	239	23680	145987	146189	146390	146793	147599	149211
10	R 454B	467	21498	132533	132927	133321	134108	135683	138833
11	R1270	2	21068	129882	129883	129885	129888	129895	129909
12	R290	3	21270	131127	131129	131132	131137	131147	131167
13	R 744	1	22413	138176	138176	138177	138179	138182	138189
14	R469A	1357	27661	170532	171676	172820	175109	179685	188838

Die Abbildung 26 dient der anschaulicheren Darstellung der Ergebnisse.

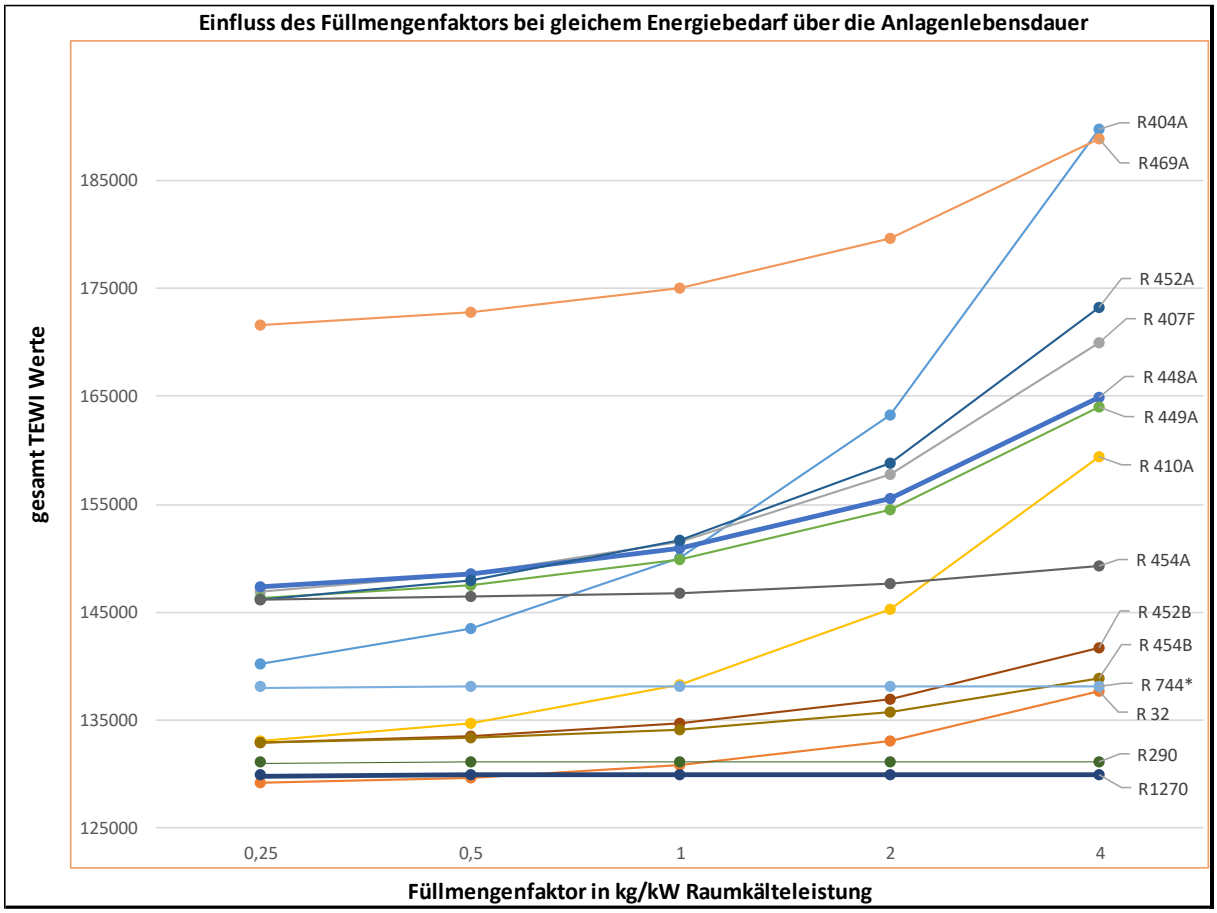


Abbildung 26: Füllmengenabhängige Veränderung der TEWI Werte der Kaskade

Im Vergleich zum Kapitel 4.2. haben sich die Werte aufgrund ihrer energetischen Effizient abermals verschoben. Insgesamt sind die meisten gesamt TEWI-Werte der Kaskade etwas höher als die des zweistufigen Kreislaufes. Eine positive Entwicklung hat sich an den gesamt TEWI-Werten des Kältemittels R744 gezeigt. Nach den Ergebnissen der Grafik ist R744 ab einer Anlagenfüllmenge von 3kg/kW das ökologischste A1 Kältemittel.

5. Auswertung

In dieser Diplomarbeit wurden verschiedene Fakten ermittelt. Im Rahmen der „Neuen-F-Gase-Verordnung“ fallen einige der bisher zulässigen Kältemittel, aufgrund ihres hohen GWP Wertes, aus dem Sortiment heraus. Weitere Kältemittel wurden bereits zuvor vom Markt genommen. Bei der Suche nach Alternativen wurden viele Kältemittel auf ihre Eignung überprüft. Eine Vorauswahl wurde dabei über die Normsiedetemperatur getroffen, indem nur die Kältemittel betrachtet wurden, welche bei einer Normsiedetemperatur unter -35°C verdampfen. Die bis dahin ausgewählten Kältemittel wurden weiterhin auf ihre Drucklage überprüft. Das Kriterium war dabei, bei einer Verdampfungstemperatur von -35°C muss ein Überdruck von mindestens 0,25 bar vorhanden sein, um ein Vakuum im Kältekreislauf und so ein Eindringen von Luft zu verhindern. Nach der Vorauswahl blieben 13 verschiedene Kältemittel übrig, welche zunächst auf ihre energetische Effizienz untersucht wurden.
Im Kapitel 3.1. wurde der einstufige Kreislauf untersucht und dabei festgestellt, dass aufgrund der hohen Heißgastemperaturen, nur zwei Kältemittel für diese Einsatzkriterien in Frage kommen. Der erste Kandidat ist das Kältemittel R290, welches brennbar ist, aber die besten energetischen Eigenschaften besitzt. Das zweite einsetzbare Kältemittel ist R452A. Die energetischen Eigenschaften dieses Gemisches sind im Vergleich zu den anderen betrachteten Kältemitteln unterdurchschnittlich, aber durch den GWP-Wert von 2140 fällt dieser nicht unter das Verbot durch die „Neue-F-Gase-Verordnung“.
Im Kapitel 3.2. wurden die zweistufigen Kreisläufe untersucht, mit dem Ergebnis, dass alle untersuchten Kältemittel einsetzbar wären, da die Heißgastemperaturen deutlich geringer sind. Ohne Zwischenkühlung des Heißgases der ersten Stufe sind R290 und R1270 die energetisch effizientesten Kältemittel, mit Zwischenkühlung ist R32 das effizienteste Kältemittel. Unter den Kältemitteln der Gruppe A1 ist es R410A.
Bei der Kaskadenschaltung wurde als Hochtemperaturkältemittel R290 bestimmt und der Vergleich wurde im Niedertemperaturbereich durchgeführt. Die energetische Effizienz wurde für die gesamte Kaskade berechnet. Die Mitteldrücke variieren je nach Tieftemperaturkältemittel und Verflüssigungsdruck. Das Kältemittel der höchsten energetischen Effizienz ist bei dieser Anwendung R1270. Unter den Kältemitteln der Gruppe A2L ist es R32 und in der A1 Gruppe ist es R410A.
Im Kapitel 4 wurde die ökologische Effizienz mithilfe des TEWI-Bewertungsansatzes untersucht. Zur Berechnung des Energiebedarfes wurden Temperaturaufzeichnungen des DWD (Messstation Potsdam) genutzt, um mithilfe der berechneten TEWI-Werte die Laufzeit der Kältemaschine für kältere Temperaturbereiche zu korrigieren.

Im eistufigen Kreislauf hatten R290 und R1270 die geringsten TEWI-Werte. R452A hätte bei geringen Füllmengen eine schlechtere ökologische Effizienz als R404A. Ursache dafür ist die schlechtere energetische Effizienz. Erst ab einer Füllmenge von 2 kg pro kW Kälteleistung (siehe Abbildung 24) ist R452A ökologisch sinnvoller als eine R404A Anlage gleicher Füllmenge.
Im zweistufigen Kreislauf wurden die Verdichterwirkungsgrade für die ökologische Berechnung angepasst und auf 65 % angehoben. In der ökologischen Effizienz zeigte sich das Kältemittel R1270 als besonders effizient. R290 hatte geringfügig höhere TEWI-Werte. Als A2L Kältemittel ist R32 am ökologisch sinnvollsten. Unter den A1 Kältemitteln ist R410A, trotz des relativ hohen GWP Wertes von 2088 am ökologisch sinnvollsten. Die Abbildung 25 zeigt, dass sich erst bei Füllmengen von über 4 kg/kW, der TEWI-Wert von R410A den von anderen A1 Kältemitteln annähert. Das Kältemittel R744 hatte sich in energetischer Hinsicht so weit verbessert, dass ab einer Füllmenge von 5 kg pro kW Kälteleistung der Einsatz dieses Kältemittels, im Vergleich zu anderen A1 Kältemitteln, ökologisch sinnvoll wäre.
Den ökologischen Berechnungen der Kaskadenschaltung wurde derselbe Verdichterwirkungsgrad zugrunde gelegt wie dem zweistufigen Prozess. Aus ökologischer Sicht sind die beiden Kältemittel R1270 und knapp danach R290 die sinnvollste Wahl. Bei der A2L Gruppe konnte sich erneut R32 mit den geringsten TEWI-Werten behaupten, bis zu einer Füllmenge von 4 kg/kW. Ab einer Füllmenge von 4 kg/kW sind mit R744 die geringeren TEWI-Werte möglich. Unter den Vertretern der A1 Kältemittel ist eine Kaskade mit R744 als Tieftemperaturkältemittel, ab einer Füllmenge von 1 kg/kW, aus ökologischer Sicht sinnvoll. Bei geringeren Füllmengen überwiegt der energetische Vorteil des Kältemittels R410A.

Die Berechnungen dieser Diplomarbeit haben damit einige Anwendungsfälle der Praxis bestätigt. In einstufigen Anlagen ist unter extremen Einsatzbedingungen die Auswahl der Kältemittel klein. In den Berechnungen dieser Arbeit konnte sich nur R452A als A1 Kältemittel behaupten. Bei kleinen Füllmengen, wie beispielweise bei einer Tiefkühltruhe, wären R290 bzw. R1270 einsetzbar. Im Bereich der Supermarkt-Kältetechnik wird zurzeit oft das Kältemittel R744 eingesetzt. Bei der zweistufigen Anwendung kann der Einsatz bei großen Füllmengen ökologisch sinnvoll sein, die Berechnungen zeigten jedoch, dass mit einer Kaskadenschaltung von R290 und R744 deutlich geringere TEWI-Werte möglich wären. Zur Erfüllung der Sicherheitsanforderungen könnte der Hochtemperaturkreislauf mit dem A3 Kältemittel R290 im Freien aufgestellt werden, wo die Füllmenge keiner Limitierung unterliegt.

Ehrenwörtliche Erklärung

"Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich",

1. dass ich, Olaf Kasiske, meine Diplomarbeit mit dem Thema

Ökologischer Vergleich ausgewählter aktueller Kältemittel im Anwendungsfall einer Tiefkühlanlage

ohne fremde Hilfe angefertigt habe,

2. dass ich die Übernahme wörtlicher Zitate aus der Literatur sowie die Verwendung der Gedanken anderer Autoren an den entsprechenden Stellen innerhalb der Arbeit gekennzeichnet habe und

3. dass ich meine Diplomarbeit bei keiner anderen Prüfung vorgelegt habe.

Ich bin mir bewusst, dass eine falsche Erklärung rechtliche Folgen haben wird.

Ort, Datum	Unterschrift

Quellenverzeichnis

- Neue F-Gase Verordnung, Verordnung (EU) Nr. 517/2014
  https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0517&from=EN

- TLMV, Verordnung über Tiefgefrorene Lebensmittel
  www.gesetze-im-internet.de

- Güntner Onlinesoftware
  https://www.myguentner.com/#/gpcDetails

- Kältetechnik; Maurer
  Thomas Maurer: Kältetechnik für Ingenieure; 2016
- TIL Media Suite; Berechnungssoftware der Fa. TLK Thermo GmbH
  https://www.tlk-thermo.com/index.php/de/tilmedia-suite

- TeGa GmbH – Technische Gase und Gastechnik GmbH
  https://www.tega.de/de/

- Danfoss Coolselector – Produktauslegunssoftware der Fa. Danfoss
  https://www.danfoss.com/de-de/service-and-support/downloads/dcs/coolselector-2/#tab-overview

- Danfoss Ref Tools, Onlineberechnungssoftware der Fa. Danfoss
  https://reftools.danfoss.com/spa/tools/ref-slider

- Recknagel, 78. Auflage
  Recknagel, Sprenger, Albers: Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik
  78. Auflage, 2017/2018

- DIN 5103; Schmierstoffe – Kältemaschinenöle, DEZ 2021

- Bitzer Auslegungssoftware, Onlinesoftware des Verdichterhersteller Bitzer
  https://www.bitzer.de/websoftware/Default.aspx?lng=de&lang=de&country=de

- Praxis der Wärmeübertragung
  Rudi Marek, Klaus Nitzsche: Praxis der Wärmeübertragung
  5. überarbeitete Auflage 2019

- TGA Fachplaner: Magazin für technische Gebäudeausrüstung
  https://www.tga-fachplaner.de/klimatechnik/niedrig-gwp-kaeltemittel-leckageraten-von-kaeltemitteln-sind-klimaanlagen-klimakiller

- Umweltbundesamt: Climate Change 15/2022; *Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2021*
  https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-der-spezifischen-kohlendioxid-8

- Kältetechnik, Ullrich, Band II
  Hans Jürgen Ullrich: Kältetechnik Band II; 2. Auflage, 1997

- DWD, Deutscher Wetterdienst, Messstation Potsdam
  https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/klarchivstunden.html;jsessionid=E9840DC77FBC655D61D68BE69D68B537.live11052?nn=16102

Anhangsverzeichnis

Anhang 1: Güntner Manual

Anhang 2: Temperaturdifferenz am VDA zw. t_{l1} und t_{0h}

Anhang 3: nach Drucklage mögliche TK Kältemittel

Anhang 4: Füllmengenberechnung brennbarer Kältemittel

Anhang 5: Beispielauslegung Tiefkühlraum

Anhang 6: Wartungsprotokolle Fa. ST und Datenblätter

Anhang 7: Füllmengenfaktor Tiefkühlanlagen

Anhang 8: optimaler Hochdruck CO_2 transkritisch

Anhang 9: VDI Wirkungsgrad bei einstufiger Verdichtung TK

Anhang 10: Berechnungsmodell einstufiger Kreislauf

Anhang 11: Berechnungsmodell einstufiger Kreislauf mit Extremwerten

Anhang 12: Berechnungsmodell zweistufiger Kreislauf

Anhang 13: Berechnungsmodell zweistufiger Kreislauf mit Extremwerten

Anhang 14: Auswahl des Hochtemperaturkältemittels der Kaskade

Anhang 15: Mitteldrucktemperatur Kaskade bei 45, 35 und 25 °C

Anhang 16: Berechnungsmodell Kaskade 1. Fall

Anhang 17: Öle für das Kältemittel R290 (Propan)

Anhang 18: Berechnungsmodell Kaskade 2. Fall

Anhang 19: Stunden nach Temperatur

Anhang 20: ökologische Effizienz einstufiger Kreislauf

Anhang 21: VDI Wirkungsgrad bei geringeren Druckverhältnissen

Anhang 22: ökologische Effizienz zweistufiger Kreislauf

Anhang 23: ökologische Effizienz Kaskade

Anhang 1

Datum: 10.8.2022

Verdampfer / GACC RX 040.1/2WN/HJA7A.UNNN

Leistung:	5,00 kW[1][2]	**Kältemittel:**	R404A[3]
Flächenreserve:	114,80 %	**Verdampfungstemp. (Taupkt):**	-31,00 °C
Luftvolumenstrom:	6 125,00 m³/h	**Überhitzung:**	10,00 K
Luftgeschwindigkeit:	2,50 m/s		
Luft Eintritt:	-20,00 °C	**Verflüssigungstemp. (Taupkt.):**	45.0 °C
Luft Austritt:	-22,00 °C	**Unterkühlungstemp.:**	42,70 °C
Luftdruck:	1 013,00 mbar		
Ventilatoren (AC): (VT0605)	2 Stück 1~230V 50Hz		
Daten je Motor (Nominaldaten):		**Schalldruckpegel:**	54,00 dB(A) in 3,00 m [5]
Drehzahl:	1310 min-1	**Schallleistung:**	76,00 dB(A)
Leistung (mech./el.):	0.10 kW/0.19 kW	**Wurfweite:**	ca. 13 m[6]
Stromaufnahme:	0,85 A[4]	**Reif:**	1,00 mm
ErP:	Konform[7]		
Ges. el. Leistungsaufnahme:	0,41 kW	**Energieeffizienzklasse:**	C
Gehäuse:	AlMg, RAL 9003	**WT-Rohre:**	Kupfer[8]
Austauschfläche:	39,20 m²	**Lamellen:**	Aluminium[8]
Rohrinhalt:	13.2 l	**Vert.-Dp:**	0,90 bar
Lam. Teilung:	7,00 mm	**Saugstutzen:**	35.0 * 1.50 mm
Leergewicht:	59 kg [10]	**Eintrittsstutzen:**	22.0 * 1.00 mm
Max. Betriebsd.:	32,00 bar	**DGRL-Klassifizierung:**	Kategorie I, Modul A[9]
Stränge:	10	**Pässe:**	8
Kreise:	1N	**Verbindungen in Luftrichtung:**	rechts
Abmessungen: [10]			
Gerätelänge:	1686 mm		
Gerätebreite:	560 mm		
Höhe:	565 mm [10]		
Zahl der Aufhängungen:	4		

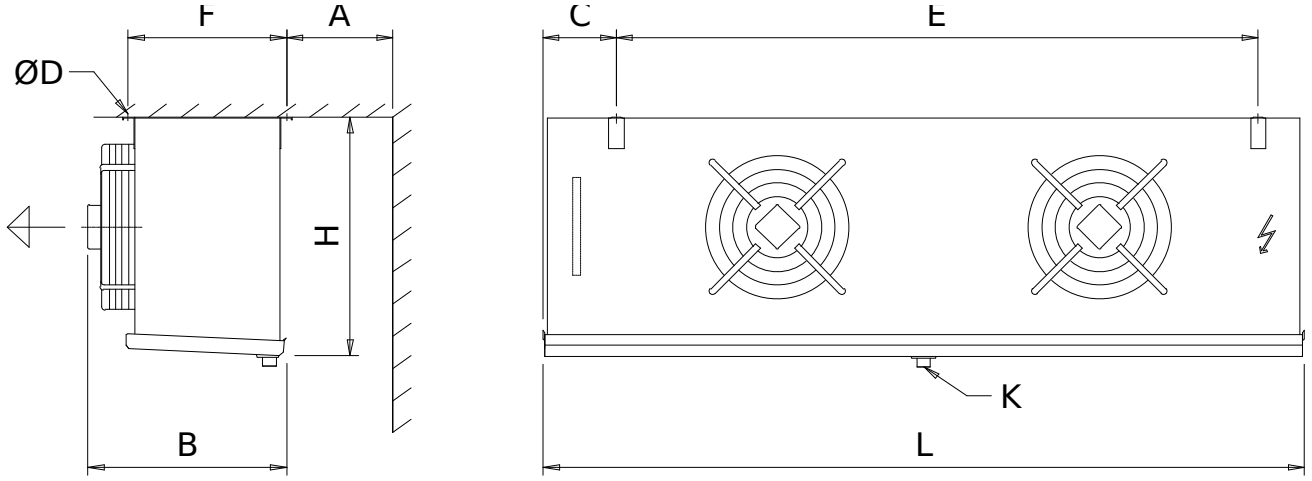
Produktcode: 247-1BGC.1H0.3VS.RZM2-R23.00.0000.000

Listenpreis ohne MwSt	**Stück**	**Einzelpreis**	**Gesamtpreis**
Stückpreis	1	2 350,00 EUR	2 350,00 EUR
Listenpreis (ohne Materialzuschlag)			2 350,00 EUR
Materialzuschlag	1	330,00 EUR	330,00 EUR
Gesamt (Listenpreis ohne MwSt, inkl. Verpackung)			**2 680,00 EUR**

Lieferzeit: 5 weeks (Stand: 2022-08-10)[11]

Es gelten unsere Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen!

Technische Änderungen vorbehalten



Ablauf nach DIN ISO 228-1 mit G-Gewinde (Flachdichtung).
Achtung: Skizze und Abmessungen gelten nicht für alle möglichen Varianten!

L = 1686 mm B = 560 mm H = 565 mm E = 1360 mm F = 406 mm C = 177 mm A = 400 mm D = 11 mm K = G1¼"

Wichtige Anmerkungen / Erläuterungen:

(1) Berechnungen und Tests der Leistungen erfolgen unter Berücksichtigung der folgenden Normen: Verflüssiger/Gaskühler EN 327, Verdampfer/Luftkühler EN 328, Rückkühler EN 1048.
(2) Leistung mit Feuchtigkeitsfaktor
(3) Fluidgruppe 2 nach Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU
(4) Die Stromaufnahme kann in Abhängigkeit von der Fördertemperatur und von Netzspannungsschwankungen gemäß VDE-Richtlinien abweichen.
(5) Nach Hüllflächenverfahren gemäß EN 13487/EN 9614-1, Toleranz = +2 dB(A). Gilt nur für AC-Ventilatoren, AC-Ventilatoren mit Sinusregler und EC-Ventilatoren. Durch andere Regelverfahren oder Wasser-Sprühsysteme verursachte Geräusche sowie am Aufstellort auftretende Schallreflexionen sind nicht berücksichtigt und können zu erhöhten Schalldruckpegeln führen.
(6) Entfernung, bei der isotherm in einem idealen Raum noch eine Luftgeschwindigkeit von 0.5 m/s messbar ist. Die erreichbare Eindringtiefe des Luftstroms in den Kühlraum ist von der Raumgeometrie und weiteren Faktoren abhängig.
(7) Dieses Gerät ist mit Ventilatoren ausgestattet, die die Effizienz-Anforderungen der Richtlinie 2009/125/EG (ErP-Verordnung) erfüllen.
(8) Das Gerät ist für stark korrosive Umgebungen (Küstennähe, Räucherräume etc.) evtl. nicht geeignet. Für weitere Informationen siehe Programm-Menü "?", "Broschüre Materialempfehlungen", oder fragen Sie Ihren Vertriebspartner.
(9) Rohrleitung (DN = 38.4 mm, TSmax = 100 °C, gasförmig). Endgültige Einstufung nach Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU bei Auftragsabwicklung.
(10) Abmessungen und Gewichte gelten nicht für alle möglichen Varianten! Sie können abweichen bei Geräten mit Zubehör oder bei Sondergeräten (S-...).
(11) Lieferzeit für Seriengeräte ab Werk, d. h. ohne Transportzeit. Zeiten für Geräte mit Auftragszeichnung, Sondergeräte, Sonderzubehör oder größere Stückzahlen auf Anfrage.

**2022-07-18, PL 5/2022, MS 4/2022,
GPC.EU Customer 2022.12-257-
64Bit**

Datum: 10.8.2022

Verdampfer / GACV RX 031.1FF/2E-70.A-18UA.1TZM

Leistung:	5,00 kW[1][2]	**Kältemittel:**	R404A[3]
Flächenreserve:	-6,00 %	**Verdampfungstemp. (Taupkt):**	-31,00 °C
Luftvolumenstrom:	3 199,00 m³/h	**Überhitzung:**	10,00 K
Luftgeschwindigkeit:	2,40 m/s		
Luft Eintritt:	-20,00 °C	**Verflüssigungstemp. (Taupkt.):**	45.0 °C
Luft Austritt:	-23,80 °C	**Unterkühlungstemp.:**	42,70 °C
Luftdruck:	1 013,00 mbar		
Ventilatoren (EC): (VT03189)	2 Stück 1~230V 50-60Hz		
Daten je Motor (Nominaldaten):		**Schalldruckpegel:**	43,00 dB(A) in 3,00 m [5]
Drehzahl:	1350 min-1	**Schallleistung:**	65,00 dB(A)
Leistung (mech./el.):	0.05 kW/0.08 kW	**Wurfweite:**	ca. 9 m[6]
Stromaufnahme:	0,70 A[4]	**Reif:**	1,00 mm
ErP:	Nicht relevant[7]		
Ges. el. Leistungsaufnahme:	0,17 kW	**Energieeffizienzklasse:**	B
Gehäuse:	AlMg, RAL 9003	**WT-Rohre:**	Kupfer[8]
Austauschfläche:	16,50 m²	**Lamellen:**	Aluminium[8]
Rohrinhalt:	5.5 l	**Vert.-Dp:**	2,20 bar
Lam. Teilung:	7,00 mm	**Saugstutzen:**	28.0 * 1.50 mm
Leergewicht:	38 kg [10]	**Eintrittsstutzen:**	16.0 * 1.00 mm
Max. Betriebsd.:	32,00 bar	**DGRL-Klassifizierung:**	Art. 4, Abs. 3[9]
Stränge:	4	**Pässe:**	12
Kreise:	1N	**Verbindungen in Luftrichtung:**	rechts
Abmessungen: [10]			
Gerätelänge:	1431 mm		
Gerätebreite:	582 mm		
Höhe:	457 mm [10]		
Zahl der Aufhängungen:	4		

UI: 18UA.1TZ

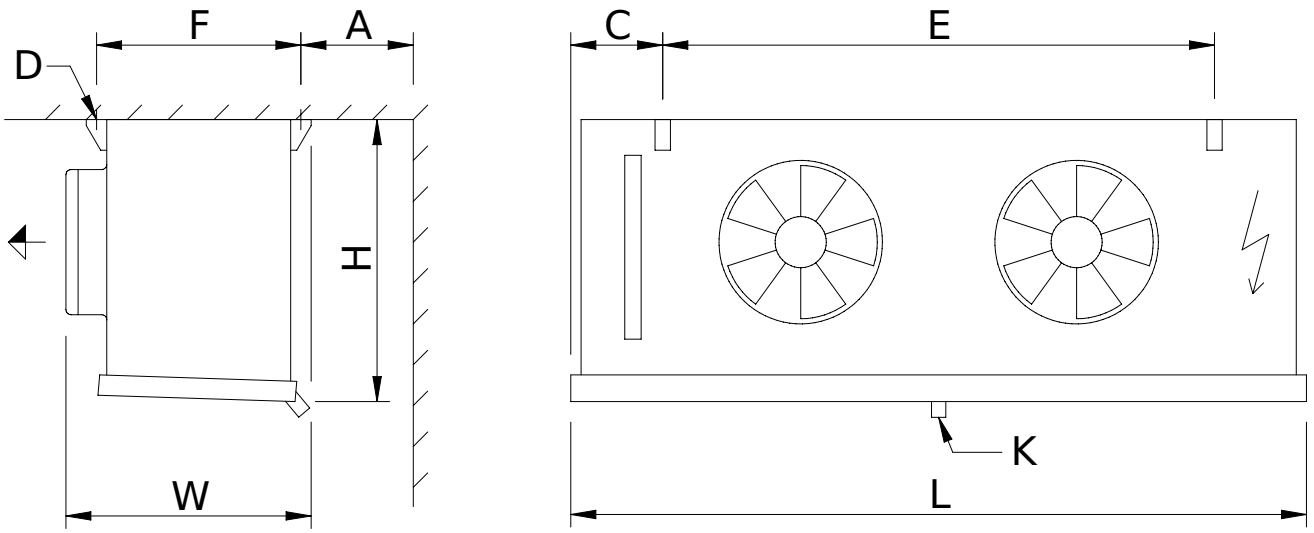
Produktcode: 253-18UA.1TZ.24J.****-1R223.00.01.0000.0000.0000.0000.016P.3041Y.4100U.5168.6169

Listenpreis ohne MwSt	**Stück**	**Einzelpreis**	**Gesamtpreis**
Stückpreis	1	2 057,00 EUR	2 057,00 EUR
Zubehöre			0,00 EUR
Listenpreis (ohne Materialzuschlag)			2 057,00 EUR
Materialzuschlag	1	288,00 EUR	288,00 EUR
Gesamt (Listenpreis ohne MwSt, inkl. Verpackung)			**2 345,00 EUR**

Lieferzeit: 21 weeks (Stand: 2022-08-10)[11]

Es gelten unsere Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen!

Technische Änderungen vorbehalten



Ablauf nach DIN ISO 228-1 mit G-Gewinde (Flachdichtung).
Achtung: Skizze und Abmessungen gelten nicht für alle möglichen Varianten!

L = 1431 mm W = 582 mm H = 457 mm E = 920 mm F = 464 mm C = 269 mm A = 300 mm D = 11 mm K = G1¼"

Zubehöre	Stück	Einzelpreis	Gesamtpreis
Montage und Verdrahtung (Schaltschrank, Ventilator)	1		
Klemmkasten Ventilatoren seriell verdrahtet [12]	1		
1 x (5209955) Klemmenblock für Ventilator TB Fan 1ph+N+Ctrl 2.5 mini x3			
1 x (5209443) Klemmkasten (Kunststoff) 130x130x99mm			
Gesamtpreis Zubehör (Listenpreis ohne MwSt)			0,00 EUR

Wichtige Anmerkungen / Erläuterungen:

(1) Berechnungen und Tests der Leistungen erfolgen unter Berücksichtigung der folgenden Normen: Verflüssiger/Gaskühler EN 327, Verdampfer/Luftkühler EN 328, Rückkühler EN 1048.
(2) Leistung mit Feuchtigkeitsfaktor
(3) Fluidgruppe 2 nach Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU
(4) Die Stromaufnahme kann in Abhängigkeit von der Fördertemperatur und von Netzspannungsschwankungen gemäß VDE-Richtlinien abweichen.
(5) Nach Hüllflächenverfahren gemäß EN 13487/EN 9614-1, Toleranz = +2 dB(A). Gilt nur für AC-Ventilatoren, AC-Ventilatoren mit Sinusregler und EC-Ventilatoren. Durch andere Regelverfahren oder Wasser-Sprühsysteme verursachte Geräusche sowie am Aufstellort auftretende Schallreflexionen sind nicht berücksichtigt und können zu erhöhten Schalldruckpegeln führen.
(6) Entfernung, bei der isotherm in einem idealen Raum noch eine Luftgeschwindigkeit von 0.5 m/s messbar ist. Die erreichbare Eindringtiefe des Luftstroms in den Kühlraum ist von der Raumgeometrie und weiteren Faktoren abhängig.
(7) Dieses Gerät ist mit Ventilatoren ausgestattet, die nicht unter die Richtlinie 2009/125/EG (ErP-Verordnung) fallen.
(8) Das Gerät ist für stark korrosive Umgebungen (Küstennähe, Räucherräume etc.) evtl. nicht geeignet. Für weitere Informationen siehe Programm-Menü "?", "Broschüre Materialempfehlungen", oder fragen Sie Ihren Vertriebspartner.
(9) Rohrleitung (DN = 32.0 mm, TSmax = 100 °C, gasförmig). Endgültige Einstufung nach Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU bei Auftragsabwicklung.
(10) Abmessungen und Gewichte gelten nicht für alle möglichen Varianten! Sie können abweichen bei Geräten mit Zubehör oder bei Sondergeräten (S-...).
(11) Lieferzeit für Seriengeräte ab Werk, d. h. ohne Transportzeit. Zeiten für Geräte mit Auftragszeichnung, Sondergeräte, Sonderzubehör oder größere Stückzahlen auf Anfrage.
(12) (GNSM02-####-ID####-MSN1-001) Breite x Höhe x Tiefe: 130 mm x 130 mm x 99 mm, Schutzart IP 54, Betriebstemperaturbereich: -35.0 °C - 60.0 °C

**2022-07-18, PL 5/2022, MS 4/2022,
GPC.EU Customer 2022.12-257-
64Bit**

Datum: 10.8.2022

Verdampfer / GACV RX 040.1DF/2A-70.A-14HZ.1H0M

Leistung:	5,00 kW[1][2]	**Kältemittel:**	R404A[3]
Flächenreserve:	26,20 %	**Verdampfungstemp. (Taupkt):**	-31,00 °C
Luftvolumenstrom:	6 765,00 m³/h	**Überhitzung:**	10,00 K
Luftgeschwindigkeit:	2,80 m/s		
Luft Eintritt:	-20,00 °C	**Verflüssigungstemp. (Taupkt.):**	45.0 °C
Luft Austritt:	-21,80 °C	**Unterkühlungstemp.:**	42,70 °C
Luftdruck:	1 013,00 mbar		
Ventilatoren (AC): (VT0605)	2 Stück 1~230V 50Hz		
Daten je Motor (Nominaldaten):		**Schalldruckpegel:**	54,00 dB(A) in 3,00 m [5]
Drehzahl:	1310 min-1	**Schallleistung:**	76,00 dB(A)
Leistung (mech./el.):	0.10 kW/0.19 kW	**Wurfweite:**	ca. 14 m[6]
Stromaufnahme:	0,85 A[4]	**Reif:**	1,00 mm
ErP:	Konform[7]		
Ges. el. Leistungsaufnahme:	0,39 kW	**Energieeffizienzklasse:**	D
Gehäuse:	AlMg, RAL 9003	**WT-Rohre:**	Kupfer[8]
Austauschfläche:	20,30 m²	**Lamellen:**	Aluminium[8]
Rohrinhalt:	6.7 l	**Vert.-Dp:**	2,30 bar
Lam. Teilung:	7,00 mm	**Saugstutzen:**	28.0 * 1.50 mm
Leergewicht:	57 kg [10]	**Eintrittsstutzen:**	16.0 * 1.00 mm
Max. Betriebsd.:	32,00 bar	**DGRL-Klassifizierung:**	Art. 4, Abs. 3[9]
Stränge:	4	**Pässe:**	10
Kreise:	1N	**Verbindungen in Luftrichtung:**	rechts
Abmessungen: [10]			
Gerätelänge:	1871 mm		
Gerätebreite:	666 mm		
Höhe:	564 mm [10]		
Zahl der Aufhängungen:	4		

UI: 14HZ.1H0

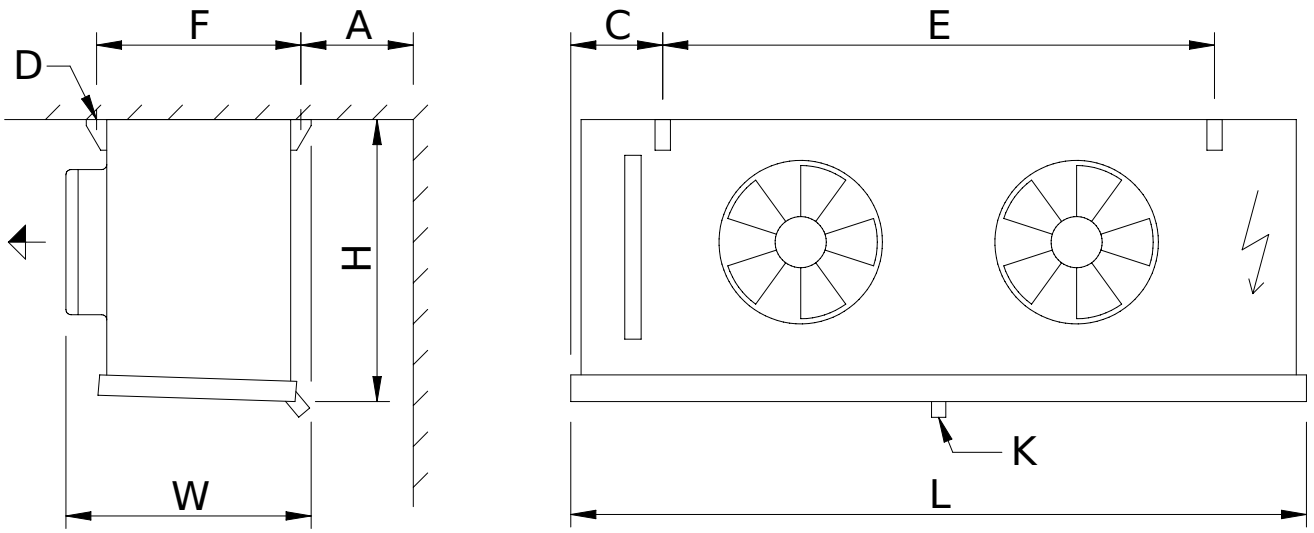
Produktcode: 253-14HZ.1H0.0J3.****-1R223.00.01.0000.0000.0000.0000.016P.3041Y.4100U.5168.6169

Listenpreis ohne MwSt	**Stück**	**Einzelpreis**	**Gesamtpreis**
Stückpreis	1	2 370,00 EUR	2 370,00 EUR
Zubehöre			0,00 EUR
Listenpreis (ohne Materialzuschlag)			2 370,00 EUR
Materialzuschlag	1	332,00 EUR	332,00 EUR
Gesamt (Listenpreis ohne MwSt, inkl. Verpackung)			**2 702,00 EUR**

Lieferzeit: 7 weeks (Stand: 2022-08-10)[11]

Es gelten unsere Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen!

Technische Änderungen vorbehalten



Ablauf nach DIN ISO 228-1 mit G-Gewinde (Flachdichtung).
Achtung: Skizze und Abmessungen gelten nicht für alle möglichen Varianten!

L = 1871 mm W = 666 mm H = 564 mm E = 1360 mm F = 573 mm C = 269 mm A = 400 mm D = 14 mm K = G1¼"

Zubehöre	Stück	Einzelpreis	Gesamtpreis
Montage und Verdrahtung (Schaltschrank, Ventilator)	1		
Klemmkasten Ventilatoren seriell verdrahtet [12]	1		
1 x (5209498) Klemmenblock für Ventilator TB Fan 1ph+N 2.5 mini x1			
1 x (5209342) Klemmkasten (Kunststoff) 130x94x81mm			
Gesamtpreis Zubehör (Listenpreis ohne MwSt)			0,00 EUR

Wichtige Anmerkungen / Erläuterungen:

(1) Berechnungen und Tests der Leistungen erfolgen unter Berücksichtigung der folgenden Normen: Verflüssiger/Gaskühler EN 327, Verdampfer/Luftkühler EN 328, Rückkühler EN 1048.
(2) Leistung mit Feuchtigkeitsfaktor
(3) Fluidgruppe 2 nach Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU
(4) Die Stromaufnahme kann in Abhängigkeit von der Fördertemperatur und von Netzspannungsschwankungen gemäß VDE-Richtlinien abweichen.
(5) Nach Hüllflächenverfahren gemäß EN 13487/EN 9614-1, Toleranz = +2 dB(A). Gilt nur für AC-Ventilatoren, AC-Ventilatoren mit Sinusregler und EC-Ventilatoren. Durch andere Regelverfahren oder Wasser-Sprühsysteme verursachte Geräusche sowie am Aufstellort auftretende Schallreflexionen sind nicht berücksichtigt und können zu erhöhten Schalldruckpegeln führen.
(6) Entfernung, bei der isotherm in einem idealen Raum noch eine Luftgeschwindigkeit von 0.5 m/s messbar ist. Die erreichbare Eindringtiefe des Luftstroms in den Kühlraum ist von der Raumgeometrie und weiteren Faktoren abhängig.
(7) Dieses Gerät ist mit Ventilatoren ausgestattet, die die Effizienz-Anforderungen der Richtlinie 2009/125/EG (ErP-Verordnung) erfüllen.
(8) Das Gerät ist für stark korrosive Umgebungen (Küstennähe, Räucherräume etc.) evtl. nicht geeignet. Für weitere Informationen siehe Programm-Menü "?", "Broschüre Materialempfehlungen", oder fragen Sie Ihren Vertriebspartner.
(9) Rohrleitung (DN = 32.0 mm, TSmax = 100 °C, gasförmig). Endgültige Einstufung nach Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU bei Auftragsabwicklung.
(10) Abmessungen und Gewichte gelten nicht für alle möglichen Varianten! Sie können abweichen bei Geräten mit Zubehör oder bei Sondergeräten (S-...).
(11) Lieferzeit für Seriengeräte ab Werk, d. h. ohne Transportzeit. Zeiten für Geräte mit Auftragszeichnung, Sondergeräte, Sonderzubehör oder größere Stückzahlen auf Anfrage.
(12) (GNSM02-####-ID####-MSNW-001) Breite x Höhe x Tiefe: 130 mm x 94 mm x 81 mm, Schutzart IP 54, Betriebstemperaturbereich: -35.0 °C - 60.0 °C

**2022-07-18, PL 5/2022, MS 4/2022,
GPC.EU Customer 2022.12-257-
64Bit**

Datum: 10.8.2022

Verdampfer / GACV RX 040.1HF/1A-70.A-14DV.1H0M

Leistung:	5,00 kW[1][2]	**Kältemittel:**	R404A[3]
Flächenreserve:	16,30 %	**Verdampfungstemp. (Taupkt):**	-31,00 °C
Luftvolumenstrom:	3 075,00 m³/h	**Überhitzung:**	10,00 K
Luftgeschwindigkeit:	2,50 m/s		
Luft Eintritt:	-20,00 °C	**Verflüssigungstemp. (Taupkt.):**	45.0 °C
Luft Austritt:	-24,00 °C	**Unterkühlungstemp.:**	42,70 °C
Luftdruck:	1 013,00 mbar		
Ventilatoren (AC): (VT0605)	1 Stück 1~230V 50Hz		
Daten je Motor (Nominaldaten):		**Schalldruckpegel:**	51,00 dB(A) in 3,00 m [5]
Drehzahl:	1310 min-1	**Schallleistung:**	73,00 dB(A)
Leistung (mech./el.):	0.10 kW/0.19 kW	**Wurfweite:**	ca. 12 m[6]
Stromaufnahme:	0,85 A[4]	**Reif:**	1,00 mm
ErP:	Konform[7]		
Ges. el. Leistungsaufnahme:	0,20 kW	**Energieeffizienzklasse:**	C
Gehäuse:	AlMg, RAL 9003	**WT-Rohre:**	Kupfer[8]
Austauschfläche:	20,30 m²	**Lamellen:**	Aluminium[8]
Rohrinhalt:	6.9 l	**Vert.-Dp:**	3,10 bar
Lam. Teilung:	7,00 mm	**Saugstutzen:**	28.0 * 1.50 mm
Leergewicht:	44 kg [10]	**Eintrittsstutzen:**	16.0 * 1.00 mm
Max. Betriebsd.:	32,00 bar	**DGRL-Klassifizierung:**	Art. 4, Abs. 3[9]
Stränge:	5	**Pässe:**	16
Kreise:	1N	**Verbindungen in Luftrichtung:**	rechts
Abmessungen: [10]			
Gerätelänge:	1191 mm		
Gerätebreite:	666 mm		
Höhe:	564 mm [10]		
Zahl der Aufhängungen:	4		

UI: 14DV.1H0

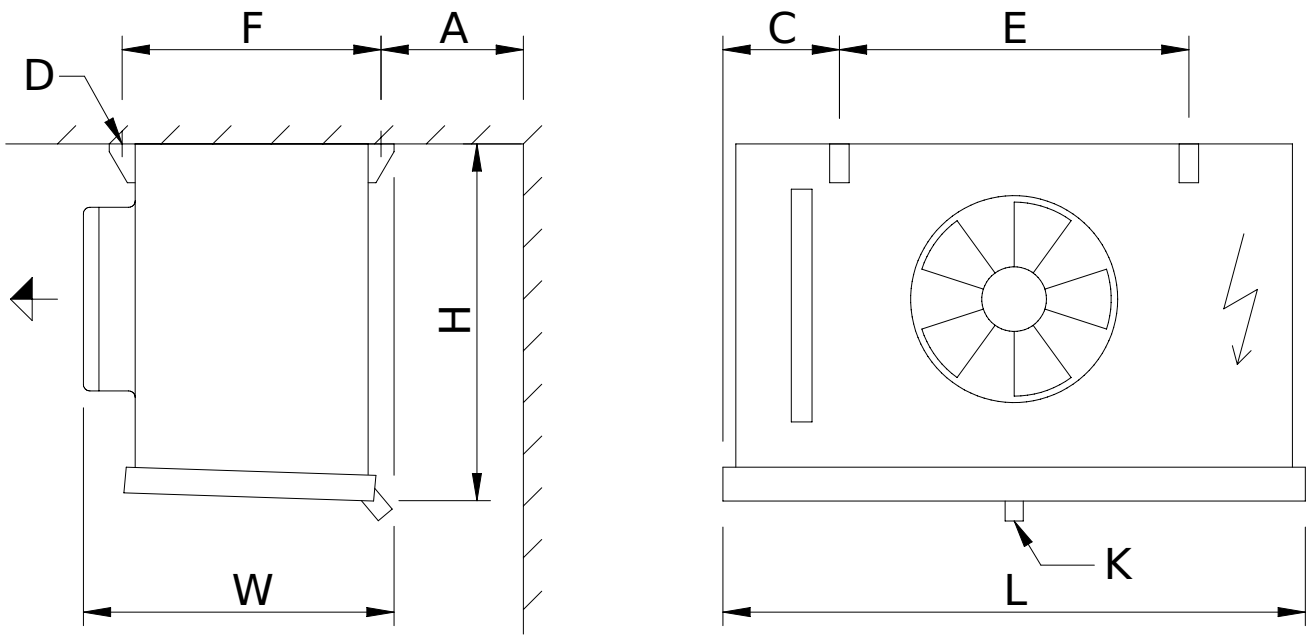
Produktcode: 253-14DV.1H0.0JE.S5PQ-1R223.00.01.0000.0000.0000.0000

Listenpreis ohne MwSt	**Stück**	**Einzelpreis**	**Gesamtpreis**
Stückpreis	1	2 025,00 EUR	2 025,00 EUR
Zubehöre			0,00 EUR
Listenpreis (ohne Materialzuschlag)			2 025,00 EUR
Materialzuschlag	1	284,00 EUR	284,00 EUR
Gesamt (Listenpreis ohne MwSt, inkl. Verpackung)			**2 309,00 EUR**

Lieferzeit: 7 weeks (Stand: 2022-08-10)[11]

Es gelten unsere Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen!

Technische Änderungen vorbehalten



Ablauf nach DIN ISO 228-1 mit G-Gewinde (Flachdichtung).
Achtung: Skizze und Abmessungen gelten nicht für alle möglichen Varianten!

L = 1191 mm W = 666 mm H = 564 mm E = 680 mm F = 573 mm C = 269 mm A = 400 mm D = 14 mm K = G1¼"

Zubehöre	Stück	Einzelpreis	Gesamtpreis
Montage und Verdrahtung (Schaltschrank, Ventilator)	1		
Klemmkasten Ventilatoren seriell verdrahtet (12)	1		
1 x (5209498) Klemmenblock für Ventilator TB Fan 1ph+N 2.5 mini x1			
1 x (5209342) Klemmkasten (Kunststoff) 130x94x81mm			
Gesamtpreis Zubehör (Listenpreis ohne MwSt)			0,00 EUR

Wichtige Anmerkungen / Erläuterungen:

(1) Berechnungen und Tests der Leistungen erfolgen unter Berücksichtigung der folgenden Normen: Verflüssiger/Gaskühler EN 327, Verdampfer/Luftkühler EN 328, Rückkühler EN 1048.
(2) Leistung mit Feuchtigkeitsfaktor
(3) Fluidgruppe 2 nach Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU
(4) Die Stromaufnahme kann in Abhängigkeit von der Fördertemperatur und von Netzspannungsschwankungen gemäß VDE-Richtlinien abweichen.
(5) Nach Hüllflächenverfahren gemäß EN 13487/EN 9614-1, Toleranz = +2 dB(A). Gilt nur für AC-Ventilatoren, AC-Ventilatoren mit Sinusregler und EC-Ventilatoren. Durch andere Regelverfahren oder Wasser-Sprühsysteme verursachte Geräusche sowie am Aufstellort auftretende Schallreflexionen sind nicht berücksichtigt und können zu erhöhten Schalldruckpegeln führen.
(6) Entfernung, bei der isotherm in einem idealen Raum noch eine Luftgeschwindigkeit von 0.5 m/s messbar ist. Die erreichbare Eindringtiefe des Luftstroms in den Kühlraum ist von der Raumgeometrie und weiteren Faktoren abhängig.
(7) Dieses Gerät ist mit Ventilatoren ausgestattet, die die Effizienz-Anforderungen der Richtlinie 2009/125/EG (ErP-Verordnung) erfüllen.
(8) Das Gerät ist für stark korrosive Umgebungen (Küstennähe, Räucherräume etc.) evtl. nicht geeignet. Für weitere Informationen siehe Programm-Menü "?", "Broschüre Materialempfehlungen", oder fragen Sie Ihren Vertriebspartner.
(9) Rohrleitung (DN = 32.0 mm, TSmax = 100 °C, gasförmig). Endgültige Einstufung nach Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU bei Auftragsabwicklung.
(10) Abmessungen und Gewichte gelten nicht für alle möglichen Varianten! Sie können abweichen bei Geräten mit Zubehör oder bei Sondergeräten (S-...).
(11) Lieferzeit für Seriengeräte ab Werk, d. h. ohne Transportzeit. Zeiten für Geräte mit Auftragszeichnung, Sondergeräte, Sonderzubehör oder größere Stückzahlen auf Anfrage.
(12) (GNSM01-####-ID####-MSNW-001) Breite x Höhe x Tiefe: 130 mm x 94 mm x 81 mm, Schutzart IP 54, Betriebstemperaturbereich: -35.0 °C - 60.0 °C

**2022-07-18, PL 5/2022, MS 4/2022,
GPC.EU Customer 2022.12-257-
64Bit**

Güntner

Datum: 10.8.2022

Verdampfer / GACC RX 040.1/2WN/FJA7A.UNNN

Leistung:	5,00 kW[1][2]	**Kältemittel:**	R404A[3]
Flächenreserve:	27,90 %	**Verdampfungstemp. (Taupkt):**	-27,00 °C
Luftvolumenstrom:	6 429,00 m³/h	**Überhitzung:**	6,00 K
Luftgeschwindigkeit:	2,60 m/s		
Luft Eintritt:	-20,00 °C	**Verflüssigungstemp. (Taupkt.):**	45.0 °C
Luft Austritt:	-21,90 °C	**Unterkühlungstemp.:**	42,70 °C
Luftdruck:	1 013,00 mbar		
Ventilatoren (AC): (VT0605)	2 Stück 1~230V 50Hz		
Daten je Motor (Nominaldaten):		**Schalldruckpegel:**	54,00 dB(A) in 3,00 m [5]
Drehzahl:	1310 min-1	**Schallleistung:**	76,00 dB(A)
Leistung (mech./el.):	0.10 kW/0.19 kW	**Wurfweite:**	ca. 13 m[6]
Stromaufnahme:	0,85 A[4]	**Reif:**	1,00 mm
ErP:	Konform[7]		
Ges. el. Leistungsaufnahme:	0,40 kW	**Energieeffizienzklasse:**	C
Gehäuse:	AlMg, RAL 9003	**WT-Rohre:**	Kupfer[8]
Austauschfläche:	29,40 m²	**Lamellen:**	Aluminium[8]
Rohrinhalt:	9.8 l	**Vert.-Dp:**	1,60 bar
Lam. Teilung:	7,00 mm	**Saugstutzen:**	28.0 * 1.50 mm
Leergewicht:	51 kg [10]	**Eintrittsstutzen:**	16.0 * 1.00 mm
Max. Betriebsd.:	32,00 bar	**DGRL-Klassifizierung:**	Art. 4, Abs. 3[9]
Stränge:	6	**Pässe:**	10
Kreise:	1N	**Verbindungen in Luftrichtung:**	rechts
Abmessungen: [10]			
Gerätelänge:	1686 mm		
Gerätebreite:	560 mm		
Höhe:	565 mm [10]		
Zahl der Aufhängungen:	4		

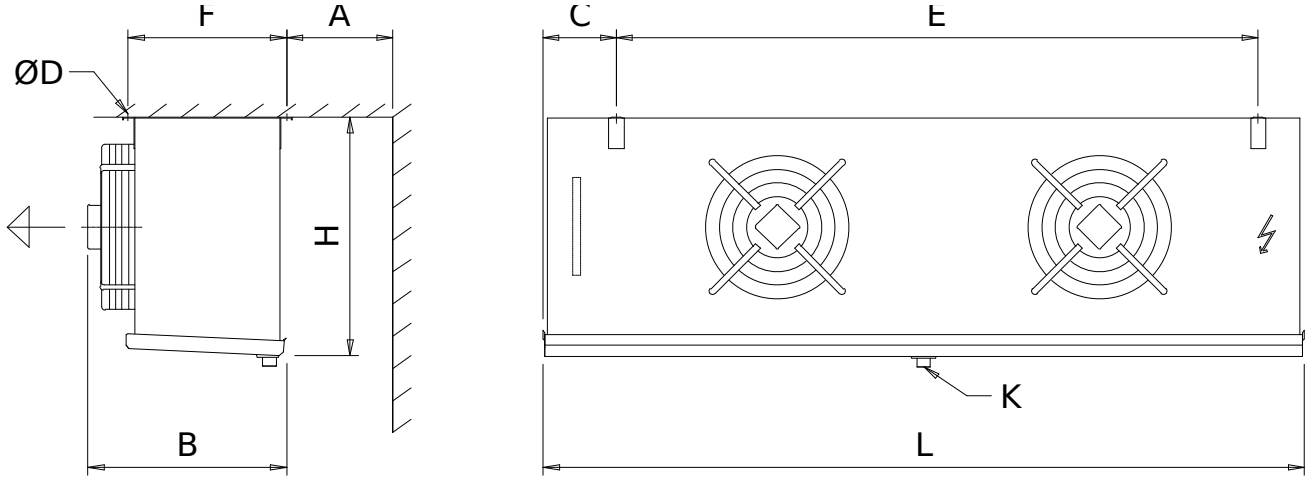
Produktcode: 247-1BFN.1H0.3VD.S5NY-R23.00.0000.000

Listenpreis ohne MwSt	**Stück**	**Einzelpreis**	**Gesamtpreis**
Stückpreis	1	2 200,00 EUR	2 200,00 EUR
Listenpreis (ohne Materialzuschlag)			2 200,00 EUR
Materialzuschlag	1	309,00 EUR	309,00 EUR
Gesamt (Listenpreis ohne MwSt, inkl. Verpackung)			**2 509,00 EUR**

Lieferzeit: 5 weeks (Stand: 2022-08-10)[11]

Es gelten unsere Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen!

Technische Änderungen vorbehalten



Ablauf nach DIN ISO 228-1 mit G-Gewinde (Flachdichtung).
Achtung: Skizze und Abmessungen gelten nicht für alle möglichen Varianten!

L = 1686 mm B = 560 mm H = 565 mm E = 1360 mm F = 406 mm C = 177 mm A = 400 mm D = 11 mm K = G1¼"

Wichtige Anmerkungen / Erläuterungen:

(1) Berechnungen und Tests der Leistungen erfolgen unter Berücksichtigung der folgenden Normen: Verflüssiger/Gaskühler EN 327, Verdampfer/Luftkühler EN 328, Rückkühler EN 1048.
(2) Leistung mit Feuchtigkeitsfaktor
(3) Fluidgruppe 2 nach Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU
(4) Die Stromaufnahme kann in Abhängigkeit von der Fördertemperatur und von Netzspannungsschwankungen gemäß VDE-Richtlinien abweichen.
(5) Nach Hüllflächenverfahren gemäß EN 13487/EN 9614-1, Toleranz = +2 dB(A). Gilt nur für AC-Ventilatoren, AC-Ventilatoren mit Sinusregler und EC-Ventilatoren. Durch andere Regelverfahren oder Wasser-Sprühsysteme verursachte Geräusche sowie am Aufstellort auftretende Schallreflexionen sind nicht berücksichtigt und können zu erhöhten Schalldruckpegeln führen.
(6) Entfernung, bei der isotherm in einem idealen Raum noch eine Luftgeschwindigkeit von 0.5 m/s messbar ist. Die erreichbare Eindringtiefe des Luftstroms in den Kühlraum ist von der Raumgeometrie und weiteren Faktoren abhängig.
(7) Dieses Gerät ist mit Ventilatoren ausgestattet, die die Effizienz-Anforderungen der Richtlinie 2009/125/EG (ErP-Verordnung) erfüllen.
(8) Das Gerät ist für stark korrosive Umgebungen (Küstennähe, Räucherräume etc.) evtl. nicht geeignet. Für weitere Informationen siehe Programm-Menü "?", "Broschüre Materialempfehlungen", oder fragen Sie Ihren Vertriebspartner.
(9) Rohrleitung (DN = 32.0 mm, TSmax = 100 °C, gasförmig). Endgültige Einstufung nach Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU bei Auftragsabwicklung.
(10) Abmessungen und Gewichte gelten nicht für alle möglichen Varianten! Sie können abweichen bei Geräten mit Zubehör oder bei Sondergeräten (S-...).
(11) Lieferzeit für Seriengeräte ab Werk, d. h. ohne Transportzeit. Zeiten für Geräte mit Auftragszeichnung, Sondergeräte, Sonderzubehör oder größere Stückzahlen auf Anfrage.

**2022-07-18, PL 5/2022, MS 4/2022,
GPC.EU Customer 2022.12-257-
64Bit**

Datum: 10.8.2022

Verdampfer / GACC RX 040.1/2WN/HJA7A.UNNN

Leistung:	5,00 kW[1][2]	**Kältemittel:**	R404A[3]
Flächenreserve:	58,30 %	**Verdampfungstemp. (Taupkt):**	-27,00 °C
Luftvolumenstrom:	6 125,00 m³/h	**Überhitzung:**	6,00 K
Luftgeschwindigkeit:	2,50 m/s		
Luft Eintritt:	-20,00 °C	**Verflüssigungstemp. (Taupkt.):**	45.0 °C
Luft Austritt:	-22,00 °C	**Unterkühlungstemp.:**	42,70 °C
Luftdruck:	1 013,00 mbar		
Ventilatoren (AC): (VT0605)	2 Stück 1~230V 50Hz		
Daten je Motor (Nominaldaten):		**Schalldruckpegel:**	54,00 dB(A) in 3,00 m [5]
Drehzahl:	1310 min-1	**Schallleistung:**	76,00 dB(A)
Leistung (mech./el.):	0.10 kW/0.19 kW	**Wurfweite:**	ca. 13 m[6]
Stromaufnahme:	0,85 A[4]	**Reif:**	1,00 mm
ErP:	Konform[7]		
Ges. el. Leistungsaufnahme:	0,41 kW	**Energieeffizienzklasse:**	C
Gehäuse:	AlMg, RAL 9003	**WT-Rohre:**	Kupfer[8]
Austauschfläche:	39,20 m²	**Lamellen:**	Aluminium[8]
Rohrinhalt:	13.2 l	**Vert.-Dp:**	0,80 bar
Lam. Teilung:	7,00 mm	**Saugstutzen:**	35.0 * 1.50 mm
Leergewicht:	59 kg [10]	**Eintrittsstutzen:**	22.0 * 1.00 mm
Max. Betriebsd.:	32,00 bar	**DGRL-Klassifizierung:**	Kategorie I, Modul A[9]
Stränge:	10	**Pässe:**	8
Kreise:	1N	**Verbindungen in Luftrichtung:**	rechts
Abmessungen: [10]			
Gerätelänge:	1686 mm		
Gerätebreite:	560 mm		
Höhe:	565 mm [10]		
Zahl der Aufhängungen:	4		

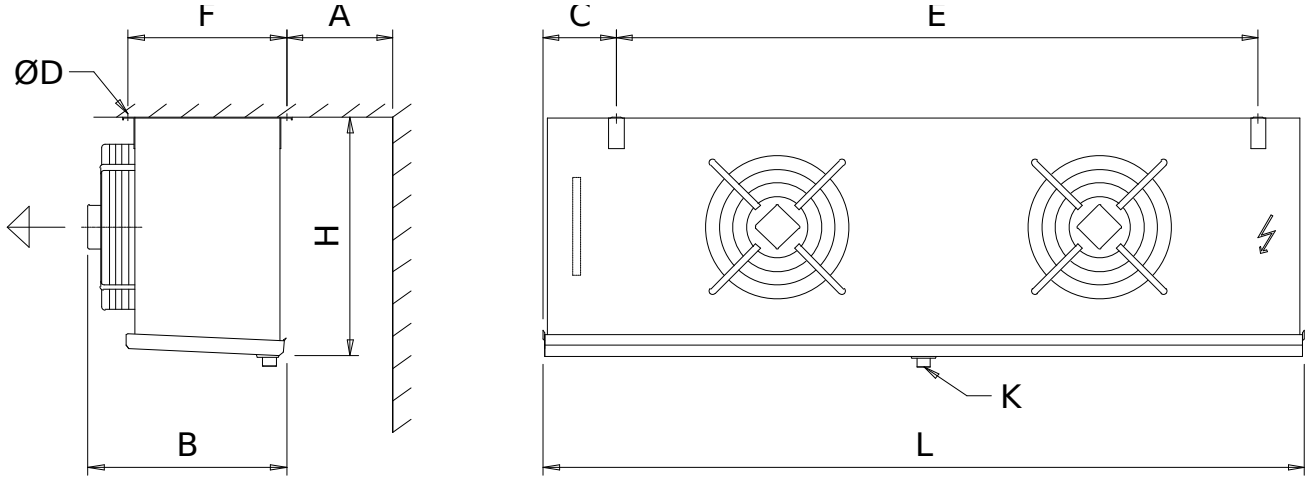
Produktcode: 247-1BGC.1H0.3VS.RZM2-R23.00.0000.000

Listenpreis ohne MwSt	**Stück**	**Einzelpreis**	**Gesamtpreis**
Stückpreis	1	2 350,00 EUR	2 350,00 EUR
Listenpreis (ohne Materialzuschlag)			2 350,00 EUR
Materialzuschlag	1	330,00 EUR	330,00 EUR
Gesamt (Listenpreis ohne MwSt, inkl. Verpackung)			**2 680,00 EUR**

Lieferzeit: 5 weeks (Stand: 2022-08-10)[11]

Es gelten unsere Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen!

Technische Änderungen vorbehalten



Ablauf nach DIN ISO 228-1 mit G-Gewinde (Flachdichtung).
Achtung: Skizze und Abmessungen gelten nicht für alle möglichen Varianten!

L = 1686 mm B = 560 mm H = 565 mm E = 1360 mm F = 406 mm C = 177 mm A = 400 mm D = 11 mm K = G1¼"

Wichtige Anmerkungen / Erläuterungen:

(1) Berechnungen und Tests der Leistungen erfolgen unter Berücksichtigung der folgenden Normen: Verflüssiger/Gaskühler EN 327, Verdampfer/Luftkühler EN 328, Rückkühler EN 1048.
(2) Leistung mit Feuchtigkeitsfaktor
(3) Fluidgruppe 2 nach Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU
(4) Die Stromaufnahme kann in Abhängigkeit von der Fördertemperatur und von Netzspannungsschwankungen gemäß VDE-Richtlinien abweichen.
(5) Nach Hüllflächenverfahren gemäß EN 13487/EN 9614-1, Toleranz = +2 dB(A). Gilt nur für AC-Ventilatoren, AC-Ventilatoren mit Sinusregler und EC-Ventilatoren. Durch andere Regelverfahren oder Wasser-Sprühsysteme verursachte Geräusche sowie am Aufstellort auftretende Schallreflexionen sind nicht berücksichtigt und können zu erhöhten Schalldruckpegeln führen.
(6) Entfernung, bei der isotherm in einem idealen Raum noch eine Luftgeschwindigkeit von 0.5 m/s messbar ist. Die erreichbare Eindringtiefe des Luftstroms in den Kühlraum ist von der Raumgeometrie und weiteren Faktoren abhängig.
(7) Dieses Gerät ist mit Ventilatoren ausgestattet, die die Effizienz-Anforderungen der Richtlinie 2009/125/EG (ErP-Verordnung) erfüllen.
(8) Das Gerät ist für stark korrosive Umgebungen (Küstennähe, Räucherräume etc.) evtl. nicht geeignet. Für weitere Informationen siehe Programm-Menü "?", "Broschüre Materialempfehlungen", oder fragen Sie Ihren Vertriebspartner.
(9) Rohrleitung (DN = 38.4 mm, TSmax = 100 °C, gasförmig). Endgültige Einstufung nach Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU bei Auftragsabwicklung.
(10) Abmessungen und Gewichte gelten nicht für alle möglichen Varianten! Sie können abweichen bei Geräten mit Zubehör oder bei Sondergeräten (S-...).
(11) Lieferzeit für Seriengeräte ab Werk, d. h. ohne Transportzeit. Zeiten für Geräte mit Auftragszeichnung, Sondergeräte, Sonderzubehör oder größere Stückzahlen auf Anfrage.

**2022-07-18, PL 5/2022, MS 4/2022,
GPC.EU Customer 2022.12-257-
64Bit**

Anhang 2

Eignung zur Tiefkühlanwendung diverser Kältemittel hinsichtlich des Überdruckes bei -35°C

p_0 min	0,25	bar	
$p_{0,abs}$	1,26325	bar	126325 Pa
t_0	-35	°C	238,15 K

													Bubble	Dew	
Nr	Kältemittel*	GWP Wert	Normsiedetemperatur in °C	Sicherheitsklasse	Komponente 1	Komponente 2	Komponente 3	Komponente 4	Anteil 1	Anteil 2	Anteil 3	Anteil 4	t0 bei mi p0 Wert in °C	Überdruck in bar bei t_0 = -35°C	geeignet (J/N)
1	R 410A	2088	-51,4	A1	Refprop.R32.fld	Refprop.R125.fld			0,495	0,505			-47,00	1,167	J
2	R32	675	-52	A2L	Refprop.R32.fld				1				-47,23	1,201	J
3	R404A	3922	-46,2 bis - 45,5	A1	Refprop.R125.fld	Refprop.R143a.fld	Refprop.R134a.fld		0,44	0,52	0,04		-41,51	0,623	J
4	R449A	1397	-46 bis -40	A1	Refprop.R134a.fld	Refprop.R1234yf.fld	Refprop.R125.fld	Refprop.R32.fld	0,261	0,249	0,251	0,239	-40,98	0,266	J
5	R452A	2140	-47 bis -43	A1	Refprop.R1234yf.fld	Refprop.R125.fld	Refprop.R32.fld		0,296	0,593	0,111		-42,34	0,472	J
6	R452B	698	-51 bis -50	A2L	Refprop.R1234yf.fld	Refprop.R125.fld	Refprop.R32.fld		0,26	0,07	0,67		-46,18	1,004	J
7	R454A	239	-48 bis -42	A2L	Refprop.R1234yf.fld	Refprop.R32.fld			0,65	0,35			-43,20	0,402	J
7	R454B	467	-49,5 bis -50,5	A2L	Refprop.R454B.MIX								-46,00	0,973	J
8	R454C	148	-45 bis - 35	A2L	Refprop.R1234yf.fld	Refprop.R32.fld			0,785	0,215			-40,78	0,138	N
9	R455A	148	-52 bis - 39	A2L	Refprop.R455A.MIX				0,035	0,755	0,21		-47,22	0,218	N
10	R744	1	- 56,5 (TP)	A1	Refprop.CO2.FLD				1				-84,21	11,011	J
11	R 290	3	-42	A3	TILMedia.PROPANE				1				-36,99	0,359	J
12	R1270	2	-48	A3	TILMedia.PROPYLENE				1				-42,65	0,725	J
13	R448A	1387	-39 bis -46	A1	Refprop.R448A.MIX								-41,46	0,270	J
14	R407H	1495	-44,5 bis -37,5	A1	Refprop.R407H.MIX								-39,92	0,135	N
15	R 407F	1825	-39,6 bis -46	A1	Refprop.R407F.MIX								-41,44	0,257	J
16	R 407 A	2107	-45bis -38,6	A1	Refprop.R407A.MIX								-40,35	0,193	N
17	R469A	1357	-61,5 bis - 78,5	A1	Refprop.CO2_ACL.FLD	Refprop.R32.fld	Refprop.R125.fld		0,35	0,325	0,325		-74,49	2,675	J

*Auswahl der Kältemittel aus der TeGa Produktpalette

Anhang 3

maximale Füllmenge des KM berechnet nach DIN 378 Teil 1 Anhang C

Anwendungsfall	Tiefkühlzelle
Kategorie	II
Zugangsbereich	C

vorhanden Kältemittelgruppen	A1	J
	A2L	J
	A2	N
	A3	J

Toxizität

bei Toxozitätsklasse	A	keine Begrenzung der Füllmenge
	B	nicht Vorhanden

Brennbarkeit

		Berechnung der max Füllmenge	
Brennbarkeitsklasse	1	keine Maßnahmen notwendig	
	2L	20% *LFL*V_{Raum} maximal 25 kg	
	2	20% *LFL*V_{raum}	maximal m_2^A
		m_2^A = 26 m^3 * LFL	
	3	unterirdisch 20% *LFL*V_{raum}	maximal 1kg
	3	oberirdisch 20% *LFL*V_{Raum} maximal 2,5 kg	

Beispielkühlraum

Berechnet über Coolselektor

Belegtes Raumvolumen			0,6
Raummaße			
L	2	m	
B	3	m	
H	2,5	m	
Raumvolumen			15 m^3

Kälteleistung	1,093 kW
EER	1,03
Lufteintrittstemperatur	-20 °C
KM Massenstrom	35,79 kg/h

Berechnung der max Füllmenge bei versch Kältemitteln

Raumvolumen 15 m^3

	Kältemittel	Gruppe	LFL Wert kg/m^3	maximaleKältemittelfüllmenge in kg
1	R 404A	A1	------	
2	R 32	A2L	0,307	0,921
3	R 407F	A1	------	
4	R410A	A2	------	
5	R 448A	A1	------	
6	R 449A	A1	------	
7	R 452A	A1	------	
8	R 452B	A2L	0,31	0,93
9	R 454A	A2L	0,278	0,834
10	R 454B	A2L	0,297	0,891
11	R 1270	A3	0,046	0,138
12	R 290	A3	0,038	0,114
13	R 744	A1	------	
14	R 469A	A1	------	

Anhang 4

Projektinformationen

Projektname:	
Anmerkungen:	
Erstellt von:	
Coolselector2 Version:	4.8.2. Datenbank: 86
Gedruckt:	Donnerstag, 21. Juli 2022
Verwendete Einstellungen:	Alle Anwendungen

Kühlraumberechnung und Komponentenauswahl 1

Kühlraumberechnung und Komponentenauswahl 1 - Verflüssigungssatz

Betriebsbedingungen (synchronisiert über die Anwendung)

Kältemittel:	R404A				
Taupunkttemperatur Verdampfung:	-31,0	°C	Umgebungstemperatur:	32,0	°C
Verdampfungsdruck:	1,962	bar	Unterkühlung:	3,0	K
Verdampfermitteltemperatur:	-31,2	°C	Zusätzliche Unterkühlung:	0	K
Nutzbare Überhitzung:	10,0	K	Höhe:	0	m
Zusätzliche Überhitzung:	0	K			
Sauggastemperatur:	-21,0	°C			
Nennbedingungen:	*Benutzerdefiniert*				
Erforderliche Kälteleistung:	*1,093 kW*				

Auswahl: OP-LSQM034AJW05G, R404A

Modell	OP-LSQM034AJW05G
Artikelnummer	114X7086
Verdichtermodell	CAJ2464Z
Produktreihe	Optyma™ Slim Pack
Produktversion	W05
Kältemittel	R404A
Kühlung [kW]	1,087
COP Kühlung [W/W]	1,03
Gesamtleistung [kW]	1,053
Gesamtstrom [A]	5,372
Frequenz [Hz]	50
Spannungsversorgung	220 - 240 V 1 ph
Tc [°C]	35,6

Kühlraumberechnung und Komponentenauswahl 1 - Kühlraumregelung

Kühlraumregelung AK-RC 111

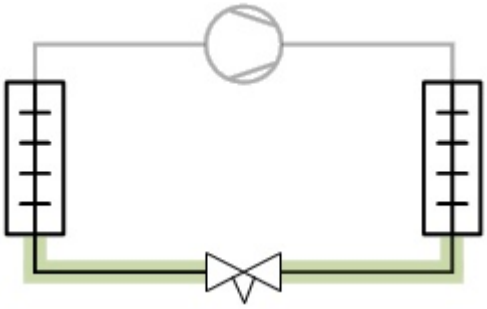
Spannungsversorgung	
Spannung	230 V~ ± 10% 50Hz / 60Hz
Max. Leistung (nur Elektronik)	~ 7 VA
Nennstrom (mit allen Verbrauchern verbunden)	16 A
Klimatische Bedingungen	
Betriebstemperatur	-5 bis 50°C
Lagertemperatur	-10 tbis70°C
Relative Feuchte der Umgebung	Niedriger als 90% rF
Generelle Eigenschaften	
Sensortypen, die angeschlossen werden können	NTC 10K 1%
Auflösung	0,1 °C
Fühlergenauigkeit	± 0.5 °C
Fühlerbereich	-45 - 99 °C
Eigenschaften der Ausgänge	
Verdichter	(Relais 30A AC1). 10 A 250 V~ (AC3) (2HP)
Abtauung	(Relais 30A AC1). 16 A 250 V~ (AC1)
Lüfter	(Relais 16A AC1). 2.7 A 250 V~ (AC3)
Licht	(Relais 16A AC1). 16 A 250 V~ (AC1)
Anmerkung	Die Summe der gleichzeitigen Stromaufnahmen darf 16 A nicht überschreiten
Aux 1 (potentialfreier Kontakt))	(Relais 5A AC1). 5(3) A 250 V~
Aux 1 (potentialfreier Kontakt))	(Relais 5A AC1). 5(3) A 250 V~
Allgemeine elektrischer Schutzgrad	)ifferenzleistungsschalter 16A. Id = 300 mA. (Id = 30 mA auf Anfrage). Trennstrom 4,5 kA
Abmaße	
Abmessungen	18.0 cm x 9.6 cm x 26.3 cm (HxBxL)
Isolation und mechanische Eigenschaften	
Schutzgrad der Box	IP65
Material der Box	ABS selbstlöschend
Typ der Isolation	Class II
Bestellung	
AK-RC 111 code number	080Z3220

Kühlraumberechnung und Komponentenauswahl 1 - Flüssigkeitsleitung

Betriebsbedingungen (synchronisiert über die Anwendung)

Kältemittel:	R404A		Kälteleistung:	1,087	kW
Massenstrom in der Leitung:	35,79	kg/h	Heizleistung:	1,710	kW
Taupunkttemperatur Verdampfung:	-31,0	°C	Taupunkttemperatur Verflüssigung:	35,6	°C
Verdampfungsdruck:	1,962	bar	Verflüssigungsdruck:	16,31	bar
Mittlere Verdampfungstemperatur:	-31,2	°C	Unterkühlung:	3,0	K
Nutzbare Überhitzung:	10,0	K	Zusätzliche Unterkühlung:	0	K
Zusätzliche Überhitzung:	0	K			
Heißgastemperatur:	68,3	°C			

System und Leitung: *Trocken - Flüssigkeitsleitung*



Leitung gesamt

Druckabfall	14,35	bar
Sättigungstemperaturabfall	66,9	K

Pipe. Leitungen: Kupferrohr DIN-EN 8

Länge	20,00	m
Winkel	0	Grad
Druckabfall	0,055	bar
Sättigungstemperaturabfall	0,1	K
Geschwindigkeit, Eintritt	0,35	m/s
Anschluss	OK	

Leitungen: Reduzierstück aus Kupfer DIN-EN 8 x 6

Nummer	1	
Druckabfall	0,001	bar
Sättigungstemperaturabfall	0,0	K
Geschwindigkeit, Eintritt	0,35	m/s
Anschluss	OK	

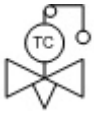
EVR. Magnetventil: EVR 3 v2

Druckabfall	0,019	bar
Sättigungstemperaturabfall	0,0	K
Geschwindigkeit, Eintritt	0,78	m/s
Ventilzustand	Geöffnet	
Anschluss	OK	

Leitungen: Erweiterung aus Kupfer DIN-EN 6 x 10

Nummer	1	
Druckabfall	0,002	bar
Sättigungstemperaturabfall	0,0	K
Geschwindigkeit, Eintritt	0,78	m/s
Anschluss	OK	

TXV. Thermostatisches Expansionsventil: T2 - 1



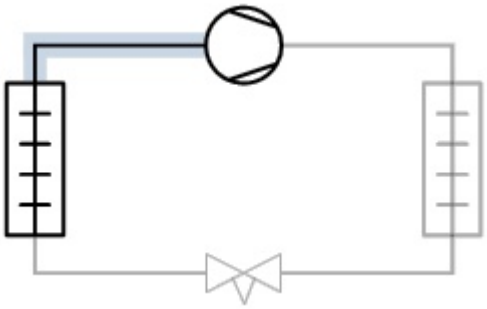
Nennleistung	1,263	kW
Min. Leistung	0,316	kW
Last	86	%
Druckabfall	14,27	bar
Sättigungstemperaturabfall	66,7	K
Geschwindigkeit, Eintritt	0,20	m/s
Ventilzustand	Geöffnet	
Anschluss	OK	

Kühlraumberechnung und Komponentenauswahl 1 - Saugleitung

Betriebsbedingungen (synchronisiert über die Anwendung)

Kältemittel:	R404A		Kälteleistung:	1,087	kW
Massenstrom in der Leitung:	35,79	kg/h	Heizleistung:	1,710	kW
Taupunkttemperatur Verdampfung:	-31,0	°C	Taupunkttemperatur Verflüssigung:	35,6	°C
Verdampfungsdruck:	1,962	bar	Verflüssigungsdruck:	16,31	bar
Mittlere Verdampfungstemperatur:	-31,2	°C	Unterkühlung:	3,0	K
Nutzbare Überhitzung:	10,0	K	Zusätzliche Unterkühlung:	0	K
Zusätzliche Überhitzung:	0	K			
Heißgastemperatur:	68,3	°C			

System und Leitung: *Trocken - Saugleitung*



Leitung gesamt

Druckabfall	0,031	bar
Sättigungstemperaturabfall	0,4	K

Pipe. Leitungen: Kupferrohr DIN-EN 18

Länge	20,00	m
Winkel	0	Grad
Druckabfall	0,031	bar
Sättigungstemperaturabfall	0,4	K
Geschwindigkeit, Eintritt	5,08	m/s
Anschluss	OK	

Kühlraumberechnung und Komponentenauswahl 1 - Kühlraum Lastberechnung

Betriebsbedingungen Verdampfer

Kälteleistung:	1,087	kW
Taupunkttemperatur:	-31,0	°C
Lufteintrittstemperatur:	-20,0	°C
Mittlere Temperaturdifferenz:	11,3	K
Leistung Lüfter (ca.)	68,8	W
Abtauheizung (ca.)	895,1	W

Berechnete Kühlraumlast:

Einstrahlung:	0,446 kW
Luftwechsel:	0,289 kW
Eis am Verdampfer:	0,018 kW
Ware, gesamt:	0,159 kW
Ware, Abkühlung:	0,159 kW
Atmungswärme:	0 kW
Licht:	0,006 kW
Personen:	0,046 kW
Ventilatoren:	0,069 kW
Andere:	0 kW
Abtauung:	0,061 kW
Gesamt:	**1,093 kW**

Kühlraum Details:

Kühlraumbedingungen:	
Temperatur:	-20,0 °C
Relative Luftfeuchte:	80,0 %
Laufzeit:	17,1 h
Maße, innen:	
Länge:	2,00 m
Breite:	3,00 m
Höhe:	2,50 m
Kühlgut:	
Typ:	Gemischte Waren, gefroren
Menge pro Tag:	666 kg
Eintrittstemperatur:	-13,0 °C
Luftwechsel:	
Temperatur:	28,0 °C
Relative Luftfeuchte:	55,0 %
Begehung:	Durchschnittlich

Luftwechselrate:	12,9
Wärmedurchgang:	
Isolierstärke:	120,0 mm
Umgebungstemperatur:	28,0 °C
Fußboden Temperatur:	20,0 °C
Isolierung Boden:	Ja
Weitere Wärmelast:	
Beleuchtung:	48 W
Ventilatoren:	68,8 W
Personen:	2,0 h/Tag
Andere:	0 W
Abtauung:	
Abtaumethode:	Elektrisch
Abtauheizung:	895,1 W
Abtauungen pro Tag:	3,0
Abtaudauer:	30

Anhang 5

Wartungsprotokoll Kälte - Klima

KÄLTE KLIMA WÄRME
GEBÄUDETECHNIK GMBH

Kunde:	Gate Gourmet GmbH Ost	**Anlage:**	**TK Halal Lager**
	An den Gehren 7	**Model:**	4DC-52Y-405
	12529 Berlin	**Ser.Nr.:**	1682104668
		Baujahr:	2011
		Raumtyp:	TK Zelle
Auftrags-Nr.:	630560-	**VDKF-Nr.:**	100336348

VERDICHTER:			**Zustand Kühlzelle/Türen/Dichtungen**		
Typ: Halbhermetik					
Verdampfungstemperatur	°C		Sicherheitskomponenten	ein	aus
Saugrohrtemperatur $t_{0ü}$	°C		Druckwächter HD		
Verflüssigungstemperatur tc	°C		Saugdruckwächter ND		
Heißgastemperatur	°C		Regelung Allgemein überprüft Ja/nein		
Ölstand (Schauglas)			Schaltschrankomponenten zB. Schütze		
Spannung Volt	V				
Stromaufnahme	L1		Raumthermostat EIN/Aus C°		
	L2		Außentemperatur / Maschinenraum	°C	
	L3				
1 Stk VERDAMPFER: Küba			**VERFLÜSSIGER:**		
2 x Typ: SGBE 081 C		Luft	Typ.		Luft
Lufteintrittstemp.	°C		Lufteintrittstemp.	°C	
Luftaustrittstemp.	°C		Luftaustrittstemp.	°C	
Raumtemperatur	°C		Heißgaseintrittstemperatur	°C	
Lüftermotor Stromaufnahme Ampere	A		Verflüssigungstemperaturausgang	°C	
Abtauung/ Heizstäbe/Kondensh 3xAmp			Verflüssigungsdruckregelung in Ordnu		
Lüftermotore Lauf/Lager			Lüfter Stromaufnahme Ampere		
Eisfreiheit Verdampfer			Lüftermotorlager Lauf/Geräusche		
Kondensablaufheizung			Verflüssiger gereinigt Ja/Nein		
Türrahmenheizung/Druckausgleich			Zustand Kälteleitungen/Komponenten		
Kältemittel	R	404a	Dichtheitsprüfung erfolgreich Ja/nein		
Kältemittelmenge	Kg	21,5	Betriebshandbuch ausgefüllt Ja/nein		

Für Berichte / Bemerkungen:
Typ: SGBE 081 C = jeweils 4,74 kW

Monteur

Datum Unterschrift

Wartungsprotokoll Kälte - Klima

ST KÄLTE KLIMA WÄRME
GEBÄUDETECHNIK GMBH

Lunite'

Kunde:	Gate Gourmet GmbH Ost	**Anlage:**	**TK Halal Neu**
	An den Gehren 7	**Model:**	TFHT 2480Z BR
	12529 Berlin	**Ser.Nr.:**	3HT77030211
		Baujahr:	2017
		Raumtyp:	TK Zelle
Auftrags-Nr.:	630560-	**VDKF-Nr.:**	100637420

VERDICHTER: Vollhermetik			Zustand Kühlzelle/ Türen/ Dichtungen		
Typ: TFHT2480Z					
Verdampfungstemperatur	Bar		Sicherheitsgeräte	ein	aus
Saugrohrtemperatur $t_{0ü}$	°C		Druckwächter HD		
Verflüssigungstemperatur tc	°C		Saugdruckschalter ND		
Heißgastemperatur	°C		Raumthermostat ein/aus °C		
Ölstand (Schauglas)			Zustand Schaltkasten / Kontakte/ Relais		
Spannung Volt	V	400			
Stromaufnahme	L1		Raumthermostat ein/aus °C		
	L2				
	L3		Temperatur Aggregatbereich		
VERDAMPFER: Küba/Keltrion			**VERFLÜSSIGER: Lunite'**		
Typ: DFBE032E		Luft	Typ.		Luft
Lufteintrittstemp.	°C		Lufteintrittstemp.	°C	
Luftaustrittstemp.	°C		Luftaustrittstemp.	°C	
Raumtemperatur	°C		Heißgaseintrittstemperatur	°C	
Abtauung/Heizung überprüft Ja/Nein	ja		Verflüssigungstemperaturausgang	°C	
Verdampfer Eisfrei Ja/Nein	ja		Druckregelung		
Kondensatheizung überprüft Ja/Nein	ja		Regelbereich °C	ein	aus
Lüftermotore Stromaufnahme Ampere			Verflüssigungstemperaturregler °C		
Kältmittel	R	R449a	Stromaufnahme Lüftermotore Ampere		
Kältemittelmenge	Kg	4,2	Verflüssiger gereinigt Ja/Nein	ja	
Türrahmenheizung /Druckausgleich			Dichtheitsprüfung erfolgreich Ja/nein	Ja	
			Betriebshandbuch aktualisiert Ja/nein	ja	

Für Berichte / Bemerkungen:
Typ: DFBE032E = 1,1 kW Kälteleistung

Monteur

Datum Unterschrift

Wartungsprotokoll Kälte - Klima

ST KÄLTE KLIMA WÄRME
GEBÄUDETECHNIK GMBH

Bitzer

Kunde:	Gate Gourmet GmbH Ost	**Anlage:**	**TK Erweiterung 1**
	An den Gehren 7	**Model:**	4PCS-102Y-40P
	12529 Berlin	**Ser.Nr.:**	1680815143
		Baujahr:	2011
		Raumtyp:	TK Zelle Viessman
Auftrags-Nr.:	630560-	**VDKF-Nr.:**	100336340
		Kältemittel	R404a 20 Kg

VERDICHTER:			Zustand Kühlzelle/Türen/Dichtungen		
Typ: Halbhermetik			Türrahmenheizungen/Druckausgleich		
Verdampfungstemperatur	°C		Sicherheitskomponenten	ein	aus
Saugrohrtemperatur $t_{0ü}$	°C		Druckwächter HD		
Verflüssigungstemperatur tc	°C		Saugdruckwächter ND		
Heißgastemperatur	°C		Pumpdown ND Pressostat		
Ölstand (Schauglas)			Schaltschrankkomponenten zB. Schütze		
Spannung Volt	V		Regelung Allgemein überprüft Ja/nein		
Stromaufnahme	L1		Raumthermostat EIN/Aus C°		
	L2		Außentemperatur / Maschinenraum	°C	
	L3				
2 Stk VERDAMPFER: Küba			**VERFLÜSSIGER: Güntner**		
Typ: 2 Stk. SGBE 081 C		Luft	Typ. GVH 050.1c/1-XE 400/1365575.001		Luft
Lufteintrittstemp.Verdampfer 3.1 und	°C		Lufteintrittstemp.	°C	
Luftaustrittstemp.Verdampfer 3.1 und	°C		Luftaustrittstemp.	°C	
Raumtemperatur	°C		Heißgaseintrittstemperatur	°C	
Stromaufnahme Lüftermotor 1+2 Amp.			Verflüssigungstemperaturausgang	°C	
Abtauung/ Heizstäbe 3.1 + 3.2 Amp. L1	6,4		Verflüssigungsdruckregelung in Ordnur		
Abtauung/ Heizstäbe 3.1 + 3.2 Amp. L2	4,42		Lüfter Stromaufnahme Ampere		
Abtauung/ Heizstäbe 3.1 + 3.2 Amp. L3	3,5		Lüftermotorlager Lauf/Geräusche		
			Verflüssiger sauber Ja / Nein		
Lüftermotore Lauf/Lager			Zustand Kälteleitungen/Komponenten		
Eisfreiheit Verdampfer			Dichtheitsprüfung erfolgreich Ja/nein		
Kondensatablaufheizung			Betriebshandbuch ausgefüllt Ja/nein		

Für Berichte / Bemerkungen:
Typ: 2 Stk. SGBE 081 C = jeweils 4,74 kW Kälteleistung

Monteur

Datum Unterschrift

Wartungsprotokoll Kälte - Klima

ST KÄLTE KLIMA WÄRME
GEBÄUDETECHNIK GMBH

Kunde:	BBW Oberlin	**Anlage:**	TK1
	Steinstraße 80/82/84	**Model:**	TAJ2464ZBR
	14480 Potsdam	**Ser.Nr.:**	668156
		Baujahr:	2005
		Raumtyp:	Tiefkühlung
Auftrags-Nr.:	600414-	**VDKF-Nr.:**	100637428

VERDICHTER:					
Typ: TAJ2464Z			S/N: 04D06122655644930100		
Verdampfungstemperatur	°C		Sicherheitsgeräte	ein	aus
Saugrohrtemperatur $t_{öü}$	°C		Druckwächter		
Verflüssigungstemperatur tc	°C		Druckbegrenzer		
Heißgastemperatur	°C		Sicherheitsdruckbegrenzer	//	
Ölstand (Schauglas)			Saugdruckschalter		
Spannung Volt	V	400	Frostschutz		
Stromaufnahme	L1		Raumthermostat		
	L2		Außentemperatur	°C	
	L3				
VERDAMPFER:			**VERFLÜSSIGER:**		
Typ: GDF030C/17-E			Typ.TAJ2464ZBR		Wasser
Lufteintrittstemp. (Wasser)	°C		Lufteintrittstemp. (Wasser)	°C	
Luftaustrittstemp. (Wasser)	°C		Luftaustrittstemp. (Wasser)	°C	
Raumtemperatur	°C		Heißgaseintrittstemperatur	°C	
Zulufttemperatur	°C		Verflüssigungstemperaturausgang	°C	
Ablufttemperatur	°C		Druckregelung	Ja	
Filtermatte - Zustand					
Kältmittel	R	404A			
Kältemittelmenge	Kg	2,3			

Für Berichte / Bemerkungen:
TAJ2464ZBR = 1,350 kW Kälteleistung
Nachfolgemodell =Tecumseh Verflüssigungssatz TAJN2464ZBR

Monteur

Datum Unterschrift

Wartungsprotokoll Kälte - Klima

ST KÄLTE KLIMA WÄRME
GEBÄUDETECHNIK GMBH

Kunde:	BBW Oberlin	**Anlage:**	TK2
	Steinstraße 80/82/84	**Model:**	TAJ2464ZBR
	14480 Potsdam	**Ser.Nr.:**	235996
		Baujahr:	2005
		Raumtyp:	Tiefkühlung
Auftrags-Nr.:	600414-	**VDKF-Nr.:**	100637429

VERDICHTER:					
Typ: TAJ2464Z			S/N: 6447930100		
Verdampfungstemperatur	°C		Sicherheitsgeräte	ein	aus
Saugrohrtemperatur $t_{öü}$	°C		Druckwächter		
Verflüssigungstemperatur tc	°C		Druckbegrenzer		
Heißgastemperatur	°C		Sicherheitsdruckbegrenzer	//	
Ölstand (Schauglas)			Saugdruckschalter		
Spannung Volt	V	400	Frostschutz		
Stromaufnahme	L1		Raumthermostat		
	L2		Außentemperatur	°C	
	L3				
VERDAMPFER:			**VERFLÜSSIGER:**		
Typ: GDF030C/17-E			Typ.TAJ2464ZBR		Wasser
Lufteintrittstemp. (Wasser)	°C		Lufteintrittstemp. (Wasser)	°C	
Luftaustrittstemp. (Wasser)	°C		Luftaustrittstemp. (Wasser)	°C	
Raumtemperatur	°C		Heißgaseintrittstemperatur	°C	
Zulufttemperatur	°C		Verflüssigungstemperaturausgang	°C	
Ablufttemperatur	°C		Druckregelung	Ja	
Filtermatte - Zustand					
Kältmittel	R	404A			
Kältemittelmenge	Kg	2,3			

Für Berichte / Bemerkungen:
TAJ2464ZBR = 1,350 kW Kälteleistung
Nachfolgemodell =Tecumseh Verflüssigungssatz TAJN2464ZBR

Monteur

Datum Unterschrift

Wartungsprotokoll Kälte - Klima

ST KÄLTE KLIMA WÄRME
GEBÄUDETECHNIK GMBH

Kunde:	BBW Oberlin	**Anlage:**	TK4
	Steinstraße 80/82/84	**Model:**	L'Unite
	14480 Potsdam	**Ser.Nr.:**	4567030220
		Baujahr:	2010
		Raumtyp:	Tiefkühlung
Auftrags-Nr.:	600414-	**VDKF-Nr.:**	100414845

DFBE 061C R404A_3,9 kg

VERDICHTER:					
Typ: TFH2480Z			S/N: 4567030220		
Verdampfungstemperatur	°C		Sicherheitsgeräte	ein	aus
Saugrohrtemperatur $t_{0ü}$	°C		Druckwächter		
Verflüssigungstemperatur tc	°C		Druckbegrenzer		
Heißgastemperatur	°C		Sicherheitsdruckbegrenzer	//	
Ölstand (Schauglas)			Saugdruckschalter		
Spannung Volt	V	400	Frostschutz		
Stromaufnahme	L1		Raumthermostat		
	L2		Außentemperatur	°C	
	L3				
VERDAMPFER:			**VERFLÜSSIGER:**		
Typ: DFBE 061C			Typ. L'unite		Wasser
Lufteintrittstemp. (Wasser)	°C		Lufteintrittstemp. (Wasser)	°C	
Luftaustrittstemp. (Wasser)	°C		Luftaustrittstemp. (Wasser)	°C	
Raumtemperatur	°C		Heißgaseintrittstemperatur	°C	
Zulufttemperatur	°C		Verflüssigungstemperaturausgang	°C	
Ablufttemperatur	°C		Druckregelung	Ja	
Filtermatte - Zustand					
Kältmittel	R	404A			
Kältemittelmenge	Kg	3,9			

Für Berichte / Bemerkungen:
Typ: DFBE 061C = 1,3 kW Kälteleistung
Nachfolgemodell: Kelvion Luftkühler DeckeTyp: MCC-301-4BE-HX32-1

Monteur

Datum Unterschrift

Wartungsprotokoll Kälte - Klima

ST KÄLTE KLIMA WÄRME
GEBÄUDETECHNIK GMBH

Kunde: Potsdamer Tafel
Drewitzer Str. 22a
14478 Potsdam Waldstadt1

Auftrags-Nr.: **650680-**

Anlage: J&E Hall
Model: JEHCCU-0225-L-
Ser.Nr.: N000359
Baujahr: 2013/03
Raumtyp: TK-Zelle
VDKF-Nr.: 100399220

14 PDM Tafel _J&E Hall JEHC

VERDICHTER:					
Typ: Danfosss/Maneurop					
Verdampfungstemperatur	°C		Sicherheitsgeräte	ein	aus
Saugrohrtemperatur $t_{0ü}$	°C		Druckwächter	###	###
Verflüssigungstemperatur tc	°C		Druckbegrenzer	x	Bar
Heißgastemperatur	°C		Sicherheitsdruckbegrenzer	###	###
Ölstand (Schauglas)		###	Saugdruckschalter		
Spannung Volt	V	400	Frostschutz	###	###
Stromaufnahme	L1		Raumthermostat		
	L2		Außentemperatur	°C	
	L3				
VERDAMPFER: GEA Küba			**VERFLÜSSIGER:**		
Typ: DEBE 091		Wasser	Typ.		Luft
Lufteintrittstemperatur	°C		Lufteintrittstemperatur	°C	
Luftaustrittstemp. (Wasser)	°C		Luftaustrittstemperatur	°C	
Raumtemperatur	°C		Heißgaseintrittstemperatur	°C	
Zulufttemperatur	°C	###	Verflüssigungstemperaturausgang	°C	
Ablufttemperatur	°C	###	Druckregelung	Ja/Nein	
Lüfterstufen		###	Regelgeräte	ein	aus
Filtermatte - Zustand		###	Temperaturregle °C		
Kältmittel	R	404a	Minimalbegrenze T °C		
Kältemittelmenge	Kg	4,4	Maximalbegrenz T °C		

Für Berichte / Bemerkungen:
Kelvion Luftkühler Decke Typ: DEBE 091 = 1,76 kW Kälteleistung

Monteur

Datum Unterschrift

Wartungsprotokoll Kälte - Klima

ST KÄLTE KLIMA WÄRME
GEBÄUDETECHNIK GMBH

Kunde: Städisches Klinikum Brandenburg
Hochstraße 29
14770 Brandenburg

Auftrags-Nr.: 690120-

Anlage: Tiefkühlanlage
Model:
Ser.Nr.:
Baujahr: 2011
Raumtyp: Kühlzelle
VDKF-Nr.: 100338022

VERDICHTER: Danfoss Maneurope					
Typ: NTZ108A4LR1A SN: VL10S703120					
Verdampfungstemperatur	°C		Sicherheitsgeräte	ein	aus
Saugrohrtemperatur $t_{öü}$	°C		Druckwächter		
Verflüssigungstemperatur tc	°C		Druckbegrenzer		
Heißgastemperatur	°C		Sicherheitsdruckbegrenzer		
Ölstand (Schauglas)			Saugdruckschalter		
Spannung Volt	V	400	Frostschutz		
Stromaufnahme	L1		Raumthermostat		
	L2		Außentemperatur	°C	
	L3				
VERDAMPFER: GEA			**VERFLÜSSIGER:**		
Typ: DFBE 071C / P0410028		Luft	Typ:		Luft
Lufteintrittstemp.	°C		Lufteintrittstemp.	°C	
Luftaustrittstemp.	°C		Luftaustrittstemp.	°C	
Raumtemperatur	°C		Heißgaseintrittstemperatur	°C	
Zulufttemperatur	°C		Verflüssigungstemperaturausgang	°C	
Ablufttemperatur	°C		Druckregelung	Ja	
Filtermatte - Zustand					
Kältmittel	R	R404			
Kältemittelmenge	Kg	12			

Für Berichte / Bemerkungen:
Typ: DFBE 071C / P0410028 = 1,8 kW Kälteleistung
Nachfolgemodel: Kelvion Luftkühler Decke: MCC-301-6BE-HX32-1

Monteur

Datum Unterschrift

Anhang 6

Berechnung diverser Füllmengenfaktoren

Nr.	Anlage	Füllmenge in kg	Leistung in kW	Kältemittel	geschätzte länge der Flüssigkeitsleitung in m	Füllmenge pro kW in kg/kW
1	SCK Schönefeld TK Halal	21,5	9,5	R404A	50	2,263157895
2	SCK Schönefeld TK Halal neu	4,2	1,1	R449A	20	3,818181818
3	SCK Schönefeld TK Erw. 1	20	9,5	R404A	50	2,105263158
4	BBW Oberlin TK 1	2,3	1,35	R404A	20	1,703703704
5	BBW Oberlin TK 2	2,3	1,35	R404A	20	1,703703704
6	BBW Oberlin TK 4	3,9	1,3	R404A	30	3
7	Potsdamer Tafel	4,4	1,76	R404A	5	2,5
8	Klinikum BRB	12	1,8	R404A	>100	6,666666667

Anhang 7

Bestimmung des optimalen HD für CO2, bei Gaskühleraustrittstemp. = 53 °C

		VFL Ausgangstemp.	53	°C	326,15	K	
		Verdampfungstemp	-27	°C	246,15	K	
		VDI Ansaugdruck	-29	°C	244,15	K	
		Überhitzung	6	K			
		Temp. VDA Ausg.	-21	°C	252,15	K	
		Temp. VDI Ansaug	0	°C	273,15	K	
		Sauggasdichte am VDI			32,02	kg/m^3	
		p0 bei -31°C			1577047	Pa	
		p0 bei -33°C			1476314	Pa	
		Stoff			Refprop.CO2.FLD		
		Entropie s			2112,27	J/kgK	
		h1 mit t0h			443,91	kJ/kg	
		h1 VDI Ansaug			467,68	kJ/kg	

	pc in bar	h3 bzw. h4	h1-h3 in kJ/kg	qv kJ/m^3	w el kJ/kg	COP	
	110	372,07	71,84	2300,66	115,76	0,62	
	120	350,99	92,92	2975,56	122,04	0,76141	
	130	337,93	105,98	3393,73	127,94	0,82837	
	140	329,42	114,49	3666,38	133,51	0,85758	
	150	323,34	120,57	3861,05	138,79	0,86871	
	156	320,43	123,49	3954,35	141,84	0,87058	
	157	319,98	123,93	3968,59	142,34	0,87064	
	158	319,55	124,36	3982,49	142,84	0,87065	
	159	319,12	124,79	3996,08	143,34	0,87060	
	160	318,71	125,20	4009,35	143,83	0,87049	
	162	317,91	126,00	4035,01	144,81	0,87014	

Bestimmung des optimalen HD für CO2, bei Gaskühleraustrittstemp. = 43 °C							
		VFL Ausgangstemp.	43	°C	316,15	K	
		Verdampfungstemp	-27	°C	246,15	K	
		VDI Ansaugdruck	-29	°C	244,15	K	
		Überhitzung	6	K			
		Temp. VDA Ausg.	-21	°C	252,15	K	
		Temp. VDI Ansaug	0	°C	273,15	K	
		Sauggasdichte am VDI			32,02	kg/m^3	
		p0 bei -31°C			1577047	Pa	
		p0 bei -33°C			1476314	Pa	
		Stoff			Refprop.CO2.FLD		
		Entropie s			2112,27	J/kgK	
		h1 mit t0h			443,91	kJ/kg	
		h1 VDI Ansaug			467,68	kJ/kg	
	pc in bar	h3 bzw. h4	h1-h3 in kJ/kg	qv kJ/m^3	w el kJ/kg	COP	
	80	415,54	28,38	908,67	93,86	0,30	
	90	376,59	67,32	2155,90	101,77	0,66	
	100	332,55	111,36	3566,19	109,03	1,02	
	110	315,52	128,39	4111,43	115,76	1,11	
	115	310,63	133,28	4268,00	118,95	1,12048	
	118	308,25	135,67	4344,41	120,81	1,12293	
	120	306,82	137,09	4389,97	122,04	1,12334	
	122	305,51	138,40	4431,97	123,25	1,12296	
	125	303,72	140,19	4489,30	125,03	1,12125	
	130	301,12	142,79	4572,70	127,94	1,11614	
	140	296,93	146,99	4706,89	133,51	1,10	
	150	293,65	150,26	4811,79	138,79	1,08	
	160	290,99	152,92	4897,06	143,83	1,06	

Bestimmung des optimalen HD für CO2, bei Gaskühleraustrittstemp. = 38 °C

		VFL Ausgangstemp.	38	°C	311,15	K	
		Verdampfungstemp	-27	°C	246,15	K	
		VDI Ansaugdruck	-29	°C	244,15	K	
		Überhitzung	6	K			
		Temp. VDA Ausg.	-21	°C	252,15	K	
		Temp. VDI Ansaug	0	°C	273,15	K	
		Sauggasdichte am VDI			32,02	kg/m^3	
		p0 bei -31°C			1577047	Pa	
		p0 bei -33°C			1476314	Pa	
		Stoff			Refprop.CO2.FLD		
		Entropie s			2112,27	J/kgK	
		h1 mit t0h			443,91	kJ/kg	
		h1 VDI Ansaug			467,68	kJ/kg	
	pc in bar	h3 bzw. h4	h1-h3 in kJ/kg	qv kJ/m^3	w el kJ/kg	COP	
	65	438,24	5,67	181,68	80,42	0,07054	
	70	426,70	17,21	551,21	85,15	0,20215	
	90	320,78	123,13	3942,99	101,77	1,20986	
	95	309,17	134,74	4314,69	105,48	1,27743	
	98	304,91	139,00	4451,24	107,63	1,29153	
	100	302,615	141,30	4524,74	109,03	1,2959	
	101	301,587	142,33	4557,68	109,73	1,2971	
	102	300,624	143,29	4588,50	110,42	1,2977	
	103	299,72	144,19	4617,47	111,10	1,2978	
	104	298,87	145,05	4644,78	111,78	1,2976	
	110	294,57	149,34	4782,25	115,76	1,2901	
	115	291,75	152,16	4872,52	118,95	1,27918	
	120	289,39	154,52	4948,16	122,04	1,26617	
	130	285,59	158,32	5069,87	127,94	1,23750	
	140	282,62	161,30	5165,18	133,51	1,2081	

Bestimmung des optimalen HD für CO2, bei Gaskühleraustrittstemp. = 33 °C

		VFL Ausgangstemp.	33	°C	306,15	K	
		Verdampfungstemp	-27	°C	246,15	K	
		VDI Ansaugdruck	-29	°C	244,15	K	
		Überhitzung	6	K			
		Temp. VDA Ausg.	-21	°C	252,15	K	
		Temp. VDI Ansaug	0	°C	273,15	K	
		Sauggasdichte am VDI			32,02	kg/m^3	
		p0 bei -31°C			1577047	Pa	
		p0 bei -33°C			1476314	Pa	
		Stoff			Refprop.CO2.FLD		
		Entropie s			2112,27	J/kgK	
		h1 mit t0h			443,91	kJ/kg	
		h1 VDI Ansaug			467,68	kJ/kg	
	pc in bar	h3 bzw. h4	h1-h3 in kJ/kg	qv kJ/m^3	w el kJ/kg	COP	
	80	305,44	138,47	4434,17	93,86	1,48	
	84	295,98	147,93	4737,24	97,11	1,52329	
	85	294,46	149,45	4785,91	97,91	1,52647	
	87	291,89	152,02	4868,16	99,47	1,52825	
	88	290,78	153,13	4903,68	100,25	1,52753	
	90	288,82	155,09	4966,55	101,77	1,52393	
	100	281,92	162,00	5187,56	109,03	1,49	
	110	277,41	166,51	5332,02	115,76	1,44	
	115	275,62	168,29	5389,08	118,95	1,41480	
	118	274,66	169,25	5419,87	120,81	1,40092	
	120	274,06	169,85	5439,18	122,04	1,39181	
	122	273,48	170,43	5457,59	123,25	1,38283	
	125	272,67	171,24	5483,71	125,03	1,36961	
	130	271,42	172,49	5523,69	127,94	1,34827	
	140	269,26	174,65	5592,81	133,51	1,31	
	150	267,45	176,46	5650,74	138,79	1,27	
	160	265,91	178,00	5700,13	143,83	1,24	

	Bestimmung des optimalen HD für CO2, bei Gaskühleraustrittstemp. = 28 °C						
		VFL Ausgangstemp.	28	°C	301,15	K	
		Verdampfungstemp	-27	°C	246,15	K	
		VDI Ansaugdruck	-29	°C	244,15	K	
		Überhitzung	6	K			
		Temp. VDA Ausg.	-21	°C	252,15	K	
		Temp. VDI Ansaug	0	°C	273,15	K	
		Sauggasdichte am VDI			32,02	kg/m^3	
		p0 bei -31°C			1577047	Pa	
		p0 bei -33°C			1476314	Pa	
		Stoff			Refprop.CO2.FLD		
		Entropie s			2112,27	J/kgK	
		h1 mit t0h			443,91	kJ/kg	
		h1 VDI Ansaug			467,68	kJ/kg	
	pc in bar	h3 bzw. h4	h1-h3 in kJ/kg	qv kJ/m^3	w el kJ/kg	COP	
	66	403,51	40,40	1293,75	81,39	0,50	
	68	390,87	53,04	1698,48	83,29	0,64	
	69	289,33	154,58	4950,04	84,22	1,84	
	70	286,51	157,40	5040,32	85,15	1,85	
	78	276,19	167,72	5370,97	92,19	1,82	
	79	275,40	168,51	5396,26	93,03	1,81	
	80	274,66	169,25	5419,90	93,86	1,80	
	85	271,54	172,37	5519,75	97,91	1,76052	
	90	269,08	174,84	5598,75	101,77	1,71791	
	100	265,28	178,63	5720,18	109,03	1,64	
	110	262,42	181,49	5811,94	115,76	1,57	
	120	260,13	183,78	5885,14	122,04	1,50593	
	130	258,25	185,66	5945,45	127,94	1,45122	
	140	256,66	187,25	5996,26	133,51	1,40	
	150	255,31	188,61	6039,73	138,79	1,36	
	160	254,13	189,78	6077,35	143,83	1,32	

Anhang 8

Mittelwertbildung vom Wirkungsgrad des TK VDI bei 1 stufigem Kältekreislauf

	Wirkungsgrade	Anlagenbezeichnung
1	0,594	LH84E/4DES-5Y
2	0,591	LH53E/2DES-2Y
3	0,56	LH64E/4FES-3Y
4	0,594	LH44E/2EES-2Y

Mittelwert 0,58475

****
BITZER Software v6.17.8 rev2725
(c) 2022, BITZER, Germany. Alle Angaben ohne Gewähr.
Donnerstag, 11. August 2022 00:18:39
****
Verdichterauslegung: Verflüssigungssätze

Vorgabewerte:

Aggregattyp	LH84E/4DES-5Y	
Baureihe	Standard	
Kältemittel	R404A	
Bezugstemperatur	Taupunkt	
Verdampfung	-29,00	°C
Umgebungstemp.	37,0	°C
Sauggastemperatur	0	°C
Nutzbare Überhitzung	100%	
Betriebsart	Auto	
Netzversorgung	400V-3-50Hz	
Leistungsregler	100%	

Ergebnis

Aggregattyp	LH84E/4DES-5Y-40S	
Leistungsstufen	100%	
Kälteleistung	5,31	kW
Verdampferleist.	5,31	kW
Leistungsaufnahme	4,27	kW
Strom (400V)	7,46	A
Spannungsbereich	380-420V	
Massenstrom	170,9	kg/h
Verflüssigung	44,7	°C
Flüss.unterkühlung	3	K
Betriebsart	Standard	

Gemäß EU Verordnung 517/2014 unterliegen die Kältemittel R404A und R507A -
besonderen Verwendungsbeschränkungen.
Vorläufige Werte: Leistungsaufnahme einschließlich Ventilator
---

Berechnung des Verdichterwirkungsgrades

Gegeben

Kältemittel	R404A		Refprop.R404A.MIX	
Verdampfung	-29	°C	244,15	K
Verflüssigung	44,7	°C	317,85	K
Sauggastemperatur	0	°C	273,15	K
Q0	5,31	kW		
Pel	4,27	kW		

Berechnet

Hochdruck	20,44902495	bar	2044902,495	Pa
Saugdruck	2,107326668	bar	210732,6668	Pa
Entropie VDI Ansaug			1785,95906	J/kgK
Enthalpie am VDI Ansaug			373,3138556	kJ/kg
IsentropeEnthalpie VDI Ausgang			426,7700059	kJ/kg
Isentrope VDI Arbeit			53,45615025	kJ/kg
Enthalpie bei Druckgastemp. Ungekühlt				kJ/kg
Enthalpiedifferenz real				kJ/kg
massenstrom	170,9	kg/h	0,047472222	kg/s
Enthalpiedifferenz			89,94733762	kJ/kg
Verdichterwirkungsgrad			0,594304975	

****

BITZER Software v6.17.8 rev2725

(c) 2022, BITZER, Germany. Alle Angaben ohne Gewähr.

Donnerstag, 11. August 2022 00:20:08

****

Verdichterauslegung: Verflüssigungssätze

Vorgabewerte:

Aggregattyp	LH53E/2DES-2Y
Baureihe	Standard
Kältemittel	R404A
Bezugstemperatur	Taupunkt
Verdampfung	-29,00 °C
Umgebungstemp.	37,0 °C
Sauggastemperatur	0 °C
Nutzbare Überhitzung	100%
Betriebsart	Auto
Netzversorgung	400V-3-50Hz
Leistungsregler	100%

Ergebnis

Aggregattyp	LH53E/2DES-2Y-40S	
Leistungsstufen	100%	
Kälteleistung	2,57	kW
Verdampferleist.	2,57	kW
Leistungsaufnahme	2,07	kW
Strom (400V)	3,81	A
Spannungsbereich	380-420V	
Massenstrom	82,6	kg/h
Verflüssigung	44,5	°C
Flüss.unterkühlung	3	K
Betriebsart	Standard	

Gemäß EU Verordnung 517/2014 unterliegen die Kältemittel R404A und R507A besonderen - Verwendungsbeschränkungen.

:Leistungsaufnahme einschließlich Ventilator

Berechnung des Verdichterwirkungsgrades

Gegeben

Kältemittel	R404A		Refprop.R404A.MIX	
Verdampfung	-29	°C	244,15	K
Verflüssigung	44,5	°C	317,65	K
Sauggastemperatur	0	°C	273,15	K
Q0	2,57	kW		
Pel	2,07	kW		

Berechnet

Hochdruck	20,35357221	bar	2035357,221	Pa
Saugdruck	2,107326668	bar	210732,6668	Pa
Entropie VDI Ansaug			1785,95906	J/kgK
Enthalpie am VDI Ansaug			373,3138556	kJ/kg
IsentropeEnthalpie VDI Ausgang			426,6580803	kJ/kg
Isentrope VDI Arbeit			53,34422466	kJ/kg
Enthalpie bei Druckgastemp. Ungekühlt				kJ/kg
Enthalpiedifferenz real				kJ/kg
massenstrom	82,6	kg/h	0,022944444	kg/s
Enthalpiedifferenz			90,21791768	kJ/kg
			0,591281932	

****

BITZER Software v6.17.8 rev2725

(c) 2022, BITZER, Germany. Alle Angaben ohne Gewähr.

Donnerstag, 11. August 2022 00:19:42

****

Verdichterauslegung: Verflüssigungssätze

Vorgabewerte:

Aggregattyp	LH64E/4FES-3Y
Baureihe	Standard
Kältemittel	R404A
Bezugstemperatur	Taupunkt
Verdampfung	-29,00 °C
Umgebungstemp.	37,0 °C
Sauggastemperatur	0 °C
Nutzbare Überhitzung	100%
Betriebsart	Auto
Netzversorgung	400V-3-50Hz
Leistungsregler	100%

Ergebnis

Aggregattyp	LH64E/4FES-3Y-40S	
Leistungsstufen	100%	
Kälteleistung	3,65	kW
Verdampferleist.	3,65	kW
Leistungsaufnahme	3,09	kW
Strom (400V)	5,52	A
Spannungsbereich	380-420V	
Massenstrom	116,9	kg/h
Verflüssigung	44,4	°C
Flüss.unterkühlung	3	K
Betriebsart	Standard	

Gemäß EU Verordnung 517/2014 unterliegen die Kältemittel R404A und R507A besonderen - Verwendungsbeschränkungen.

Vorläufige Werte.: Leistungsaufnahme einschließlich Ventilator

---

Berechnung des Verdichterwirkungsgrades

Gegeben

Kältemittel	R404A		Refprop.R404A.MIX	
Verdampfung	-29	°C	244,15	K
Verflüssigung	44,4	°C	317,55	K
Sauggastemperatur	0	°C	273,15	K
Q0	3,65	kW		
Pel	3,09	kW		

Berechnet

Hochdruck	20,30597366	bar	2030597,366	Pa
Saugdruck	2,107326668	bar	210732,6668	Pa
Entropie VDI Ansaug			1785,95906	J/kgK
Enthalpie am VDI Ansaug			373,3138556	kJ/kg
IsentropeEnthalpie VDI Ausgang			426,6020639	kJ/kg
Isentrope VDI Arbeit			53,28820821	kJ/kg
Enthalpie bei Druckgastemp. Ungekühlt				kJ/kg
Enthalpiedifferenz real				kJ/kg
massenstrom	116,9	kg/h	0,032472222	kg/s
Enthalpiedifferenz			95,15825492	kJ/kg
			0,559995644	

****
BITZER Software v6.17.8 rev2725
(c) 2022, BITZER, Germany. Alle Angaben ohne Gewähr.
Donnerstag, 11. August 2022 00:20:39
****

Verdichterauslegung: Verflüssigungssätze

Vorgabewerte:

Aggregattyp	LH44E/2EES-2Y	
Baureihe	Standard	
Kältemittel	R404A	
Bezugstemperatur	Taupunkt	
Verdampfung	-29,00	°C
Umgebungstemp.	37,0	°C
Sauggastemperatur	0	°C
Nutzbare Überhitzung	100%	
Betriebsart	Auto	
Netzversorgung	400V-3-50Hz	
Leistungsregler	100%	

Ergebnis

Aggregattyp	LH44E/2EES-2Y-40S	
Leistungsstufen	100%	
Kälteleistung	2,09	kW
Verdampferleist.	2,09	kW
Leistungsaufnahme	1,73	kW
Strom (400V)	3,27	A
Spannungsbereich	380-420V	
Massenstrom	68,4	kg/h
Verflüssigung	45,8	°C
Flüss.unterkühlung	3	K
Betriebsart	Standard	

Dieser Verflüssigungssatz ist mit dem gewählten Kältemittel innerhalb der EU aufgrund der -
gesetzlichen Bestimmungen aus der -
Verordnung (EU) 2015/1095 nur für Verdampfungstemperaturen unterhalb -15°C bestimmt.
Zulässige Verflüssigungssatz-Kältemittel-Kombinationen siehe Konformitätserklärung AC-500
Gemäß EU Verordnung 517/2014 unterliegen die Kältemittel R404A und R507A -
besonderen Verwendungsbeschränkungen.
Vorläufige Werte.: Leistungsaufnahme einschließlich Ventilator

---

Berechnung des Verdichterwirkungsgrades

Gegeben

Kältemittel	R404A		Refprop.R404A.MIX	
Verdampfung	-29	°C	244,15	K
Verflüssigung	45,8	°C	318,95	K
Sauggastemperatur	0	°C	273,15	K
Q0	2,09	kW		
Pel	1,73	kW		

Berechnet

Hochdruck	20,98014911	bar	2098014,911	Pa
Saugdruck	2,107326668	bar	210732,6668	Pa
Entropie VDI Ansaug			1785,95906	J/kgK
Enthalpie am VDI Ansaug			373,3138556	kJ/kg
IsentropeEnthalpie VDI Ausgang			427,3830521	kJ/kg
Isentrope VDI Arbeit			54,06919647	kJ/kg
Enthalpie bei Druckgastemp. Ungekühlt				kJ/kg
Enthalpiedifferenz real				kJ/kg
massenstrom	68,4	kg/h	0,019	kg/s
Enthalpiedifferenz			91,05263158	kJ/kg
			0,593823545	

Anhang 9

Ergebnisse zum Berechnungsmodell einstufiger Kreislauf

Modell 1 Einstufiger Prozess

Ergebnissezu I, t_c = 45 °C

	Kältemittel	COP_{ideal}	COP_{real}	t_{V2} in °C	t_{V2} in °C	Druckverhältnis
				ideal	real	p_c/p_0
1	R404A	1,701	0,936	81,306	119,278	9,772
2	R 32	1,990	1,095	148,040	227,719	9,809
3	R 407F	1,789	0,984	109,066	166,316	12,930
4	R 410A	1,878	1,033	111,845	168,307	9,741
5	R 448A	1,751	0,963	101,586	153,960	12,570
6	R 449A	1,761	0,969	99,935	151,175	12,385
7	R 452A	1,636	0,900	84,723	125,342	11,183
8	R 452B	1,921	1,057	122,875	186,734	10,060
9	R 454A	1,735	0,954	102,826	155,038	11,914
10	R 454B	1,924	1,058	123,931	188,516	10,113
11	R1270	2,008	1,104	92,965	141,435	8,375
12	R290	2,019	1,110	83,562	126,788	8,791
13	R 744	1,123	0,618	171,463	253,794	8,128
14	R469A	1,294	0,712	148,650	224,050	11,614

Ergebnissezu II, t_c = 35 °C

	Kältemittel	COP_{ideal}	COP_{real}	t_{V2} in °C	t_{V2} in °C	Druckverhältnis
				ideal	real	p_c/p_0
1	R404A	2,249	1,237	71,084	106,328	7,685
2	R 32	2,477	1,362	130,219	202,493	7,686
3	R 407F	2,233	1,228	97,098	150,120	10,144
4	R 410A	2,395	1,317	98,199	149,766	7,643
5	R 448A	2,204	1,212	90,318	138,929	9,886
6	R 449A	2,221	1,221	88,758	136,311	9,735
7	R 452A	2,139	1,176	74,686	112,586	8,816
8	R 452B	2,412	1,326	108,242	166,544	7,901
9	R 454A	2,188	1,203	91,343	139,780	9,403
10	R 454B	2,411	1,326	109,224	168,201	7,944
11	R1270	2,541	1,398	81,616	126,237	6,670
12	R290	2,547	1,401	73,565	113,486	6,978
13	R 744	1,528	0,841	140,685	209,945	5,893
14	R469A	1,673	0,920	134,786	205,022	9,558

	Ergebnissezu III, t_c =			25 °C			
	Kältemittel	COP_{ideal}	COP_{real}	t_{V2} in °C	t_{V2} in °C	Druckverhältnis	
				ideal	real	p_c/p_0	
1	R404A	2,952	1,623	60,823	92,722	5,953	
2	R 32	3,125	1,719	111,839	175,928	5,930	
3	R 407F	2,801	1,541	84,827	132,978	7,830	
4	R 410A	3,071	1,689	84,246	130,255	5,906	
5	R 448A	2,780	1,529	78,801	123,023	7,649	
6	R 449A	2,806	1,543	77,344	120,585	7,529	
7	R 452A	2,775	1,526	64,561	99,129	6,839	
8	R 452B	3,055	1,680	93,210	145,259	6,110	
9	R 454A	2,764	1,520	79,608	123,647	7,303	
10	R 454B	3,051	1,678	94,108	146,777	6,144	
11	R1270	3,240	1,782	70,042	110,131	5,235	
12	R290	3,242	1,783	63,327	99,313	5,455	
13	R 744	2,253	1,239	113,317	170,594	4,358	
14	R469A	2,118	1,165	120,285	184,779	7,745	
		Prozentuale Unterschied zu R404A					
		I	II	III			
1	R404A	100	100	100			
2	R 32	117,0	110,1	105,9			
3	R 407F	105,1	99,3	94,9			
4	R 410A	110,4	106,5	104,1			
5	R 448A	102,9	98,0	94,2			
6	R 449A	103,5	98,7	95,1			
7	R 452A	96,2	95,1	94,0			
8	R 452B	112,9	107,2	103,5			
9	R 454A	102,0	97,3	93,6			
10	R 454B	113,1	107,2	103,4			
11	R1270	118,0	113,0	109,8			
12	R290	118,7	113,2	109,8			
13	R 744	66,0	68,0	76,3			
14	R469A	76,0	74,4	71,8			

Berechnungen zum einstufigen Kreislauf

Betriebsbedingungen

Verflüssigungstemperatur I	45	°C	318,15	K		
Verflüssigerausgangstemperatur I	43	°C	316,15	K		
Verflüssigungstemperatur II	35	°C	308,15	K		
Verflüssigerausgangstemperatur II	33	°C	306,15	K		
Verflüssigungstemperatur III	25	°C	298,15	K		
Verflüssigerausgangstemperatur III	23	°C	296,15	K		
Unterkühlung	2	K	2	K	Normalzust.	
Verdampfungstemperatur	-27	°C	246,15	K		
Überhitzung	6	K	6	K	--> Quelle	
Verdampferaustrittstemperatur KM	-21	°C	252,15	K		
Verdichteransaugtemperatur	0	°C	273,15	K	--> Annahme	
VDA Ansaugtemperatur Luft	-20	°C	253,15	K		
Druckabfall Saugleitung bis zum VDI	2	k	2	K	--> Annahme	
Saugdruck am VDI	-29	°C	244,15	K	--> Quelle+Neuere	
Wirkungsgrad Verdichter	55	%	0,55		Annahmen finden	

Zwischenwerte

				Variable Hochdrücke I, II und III		
	Kältemittel	TIL Bezeichnung	p_0 in Pa	p_c I	p_c II	p_c III
1	R404A	Refprop.R404A.MIX	228556	2059284	1619535	1254580
2	R 32	Refprop.R32.fld	308963	2794777	2189831	1689619
3	R 407F	Refprop.R407F.MIX	182936	2165116	1698613	1311022
4	R 410A	Refprop.R410A.MIX	304262	2733533	2144850	1657437
5	R 448A	Refprop.R448A.MIX	183646	2115975	1664178	1287641
6	R 449A	Refprop.R449A.MIX	183755	2086739	1640293	1268519
7	R 452A	Refprop.R452A.MIX	208398	2143963	1690105	1311121
8	R 452B	Refprop.R452B.MIX	281467	2611209	2050874	1585907
9	R 454A	Refprop.R454A.MIX	200305	2193443	1731064	1344427
10	R 454B	Refprop.R454B.MIX	277249	2585528	2031062	1570811
11	R1270	VDIWA2006.propene	238231	1851208	1474277	1157055
12	R290	Refprop.PROPANE.FLD	188559	1534312	1217882	952073
13	R 744	Refprop.CO2.FLD	1577047	12000000	8700000	6434244
14	R469A Bestandteile	Prozentanteile	512054	5491143	4518953	3662007
	Refprop.CO2.FLD	0,35				
	Refprop.R32.fld	0,325				
	Refprop.R125.fld	0,325				

spezifische Verdampfungsenthalpie q_0 zu I, II und III, Entropie und Enthalpie am VDI Ansaug

	Kältemittel	q_0 in kJ/kg			t_0 am VDI	$h_{VDI\,1}$	s_{VDI}
		I	II	III	in Pa	in kJ/kg	in J/kgK
1	R404A	91,23	107,62	123,09	210733	373,31	1786
2	R 32	231,62	252,23	271,68	284909	533,80	2374
3	R 407F	138,90	155,50	171,34	167443	424,44	2041
4	R 410A	144,82	163,03	180,13	280622	436,69	2041
5	R 448A	125,55	141,93	157,56	168338	413,32	2020
6	R 449A	123,73	140,06	155,65	168488	411,11	1999
7	R 452A	88,95	104,51	119,26	191719	370,26	1786
8	R 452B	176,13	195,14	213,10	259566	476,95	2207
9	R 454A	130,03	147,14	163,43	184100	426,34	2000
10	R 454B	179,86	198,96	217,01	255665	482,07	2214
11	R1270	242,94	272,63	300,61	221039	590,86	2609
12	R290	237,33	265,98	293,48	174536	586,85	2592
13	R 744	137,09	152,02	179,74	1476314	467,68	2112
14	R469A	138,82	162,99	184,33	472794	450,53	2208

	Kältemittel	w_{is} in kJ/kg			w_{real} in kJ/kg		
		I	II	III	I	II	III
1	R404A	53,62	47,86	41,70	97,50	87,01	75,82
2	R 32	116,36	101,83	86,94	211,57	185,15	158,07
3	R 407F	77,66	69,63	61,17	141,20	126,59	111,21
4	R 410A	77,10	68,07	58,65	140,19	123,76	106,63
5	R 448A	71,70	64,40	56,68	130,37	117,10	103,05
6	R 449A	70,26	63,07	55,46	127,75	114,68	100,84
7	R 452A	54,37	48,86	42,98	98,85	88,84	78,14
8	R 452B	91,68	80,92	69,74	166,70	147,13	126,81
9	R 454A	74,94	67,26	59,14	136,26	122,29	107,52
10	R 454B	93,47	82,51	71,14	169,95	150,03	129,34
11	R1270	121,01	107,28	92,78	220,01	195,05	168,69
12	R290	117,56	104,44	90,53	213,75	189,90	164,59
13	R 744	122,04	99,47	79,78	221,89	180,86	145,05
14	R469A	107,29	97,41	87,01	195,08	177,10	158,21

	Kältemittel	COP_{ideal}			COP_{real}		
		I	II	III	I	II	III
1	R404A	1,701	2,249	2,952	0,936	1,237	1,623
2	R 32	1,990	2,477	3,125	1,095	1,362	1,719
3	R 407F	1,789	2,233	2,801	0,984	1,228	1,541
4	R 410A	1,878	2,395	3,071	1,033	1,317	1,689
5	R 448A	1,751	2,204	2,780	0,963	1,212	1,529
6	R 449A	1,761	2,221	2,806	0,969	1,221	1,543
7	R 452A	1,636	2,139	2,775	0,900	1,176	1,526
8	R 452B	1,921	2,412	3,055	1,057	1,326	1,680
9	R 454A	1,735	2,188	2,764	0,954	1,203	1,520
10	R 454B	1,924	2,411	3,051	1,058	1,326	1,678
11	R1270	2,008	2,541	3,240	1,104	1,398	1,782
12	R290	2,019	2,547	3,242	1,110	1,401	1,783
13	R 744	1,123	1,528	2,253	0,618	0,841	1,239
14	R469A	1,294	1,673	2,118	0,712	0,920	1,165

		t_{V2} in °C ideal			t_{V2} in °C real		
		I	II	III	I	II	III
1	R404A	81,31	71,08	60,82	119,3	106,33	92,72
2	R 32	148,04	130,22	111,84	227,7	202,49	175,93
3	R 407F	109,07	97,10	84,83	166,3	150,12	132,98
4	R 410A	111,85	98,20	84,25	168,3	149,77	130,25
5	R 448A	101,59	90,32	78,80	154,0	138,93	123,02
6	R 449A	99,94	88,76	77,34	151,2	136,31	120,59
7	R 452A	84,72	74,69	64,56	125,3	112,59	99,13
8	R 452B	122,87	108,24	93,21	186,7	166,54	145,26
9	R 454A	102,83	91,34	79,61	155,0	139,78	123,65
10	R 454B	123,93	109,22	94,11	188,5	168,20	146,78
11	R1270	92,96	81,62	70,04	141,4	126,24	110,13
12	R290	83,56	73,57	63,33	126,8	113,49	99,31
13	R 744	171,46	140,68	113,32	253,8	209,94	170,59
14	R469A	148,65	134,79	120,28	224,1	205,02	184,78

		Druckverhältnis p_c/p_0		
		I	II	III
1	R404A	9,77	7,69	5,95
2	R 32	9,81	7,69	5,93
3	R 407F	12,93	10,14	7,83
4	R 410A	9,74	7,64	5,91
5	R 448A	12,57	9,89	7,65
6	R 449A	12,39	9,74	7,53
7	R 452A	11,18	8,82	6,84
8	R 452B	10,06	7,90	6,11
9	R 454A	11,91	9,40	7,30
10	R 454B	10,11	7,94	6,14
11	R1270	8,38	6,67	5,23
12	R290	8,79	6,98	5,45
13	R 744	8,13	5,89	4,36
14	R469A	11,61	9,56	7,75

Anhang 10

Berechnungen zu den Extremwerten des einstufigen Kreislauf

Betriebsbedingungen

Verflüssigungstemperatur I	55	°C	328,15	K		
Verflüssigerausgangstemperatur I	53	°C	326,15	K		
Verflüssigungstemperatur II	35	°C	308,15	K		
Verflüssigerausgangstemperatur II	33	°C	306,15	K		
Verflüssigungstemperatur III	15	°C	288,15	K		
Verflüssigerausgangstemperatur III	13	°C	286,15	K		
Unterkühlung	2	K	2	K	Normalzust.	
Verdampfungstemperatur	-33	°C	240,15	K		
Überhitzung	12	K	12	K	--> Quelle	
Verdampferaustrittstemperatur KM	-21	°C	252,15	K		
Verdichteransaugtemperatur	20	°C	293,15	K	--> Annahme	
VDA Ansaugtemperatur Luft	-20	°C	253,15	K		
Druckabfall Saugleitung bis zum VDI	2	k	2	K	--> Annahme	
Saugdruck am VDI	-35	°C	238,15	K	--> Quelle+Neuere	
Wirkungsgrad Verdichter	50	%	0,5		Annahmen finden	

Zwischenwerte

				Variable Hochdrücke I, II und III			
	Kältemittel	TIL Bezeichnung	p_0 in Pa	p_c I		p_c II	p_c III
1	R404A	Refprop.R404A.MIX	178308	2585122		1619535	955005
2	R 32	Refprop.R32.fld	241180	3519873		2189831	1280811
3	R 407F	Refprop.R407F.MIX	139549	2720343		1698613	993271
4	R 410A	Refprop.R410A.MIX	237622	3439053		2144850	1258376
5	R 448A	Refprop.R448A.MIX	140721	2651856		1664178	978033
6	R 449A	Refprop.R449A.MIX	140935	2616835		1640293	963032
7	R 452A	Refprop.R452A.MIX	161485	2681700		1690105	998707
8	R 452B	Refprop.R452B.MIX	219742	3280090		2050874	1204699
9	R 454A	Refprop.R454A.MIX	154767	2740120		1731064	1025355
10	R 454B	Refprop.R454B.MIX	216422	3247062		2031062	1193374
11	R1270	VDIWA2006.propene	189524	2294429		1474277	893265
12	R290	Refprop.PROPANE.FLD	148901	1907169		1217882	731511
13	R 744	Refprop.CO2.FLD	1289143	12000000		8700000	5087147
14	R469A Bestandteile	Prozentanteile	401290	6500263		4518953	2922135
	Refprop.CO2.FLD	0,35					
	Refprop.R32.fld	0,325					
	Refprop.R125.fld	0,325					

spezifische Verdampfungsenthalpie q_0 zu I, II und III, Entropie und Enthalpie am VDI Ansaug

	Kältemittel	q_0 in kJ/kg			t_0 am VDI		$h_{VDI\ 1}$	s_{VDI}
		I	II	III	in Pa		in kJ/kg	in J/kgK
1	R404A	74,90	108,99	139,26	163616		391,60	1871
2	R 32	212,28	255,18	293,21	221380		553,15	2481
3	R 407F	122,69	156,90	187,99	127048		441,80	2130
4	R 410A	127,18	165,28	198,64	218140		454,82	2133
5	R 448A	109,47	143,24	173,92	128319		430,91	2108
6	R 449A	107,70	141,37	171,96	128555		428,71	2086
7	R 452A	73,42	105,65	134,55	147837		387,47	1867
8	R 452B	157,92	197,46	232,58	201706		495,85	2305
9	R 454A	113,28	148,59	180,55	141545		444,78	2091
10	R 454B	161,59	201,27	236,60	198651		501,09	2313
11	R1270	212,68	274,19	328,73	175127		622,40	2765
12	R290	209,08	267,77	321,77	137225		620,88	2756
13	R 744	98,30	157,40	215,86	1202419		490,37	2228
14	R469A	110,16	165,44	206,47	368847		469,27	2307

	Kältemittel	w_{is} in kJ/kg			w_{real} in kJ/kg		
		I	II	III	I	II	III
1	R404A	72,99	60,10	45,64	145,98	120,21	91,28
2	R 32	160,34	127,81	93,58	320,67	255,61	187,17
3	R 407F	104,21	86,45	66,88	208,41	172,90	133,76
4	R 410A	105,72	85,50	63,65	211,43	171,00	127,29
5	R 448A	96,11	79,97	62,03	192,21	159,94	124,06
6	R 449A	94,25	78,35	60,68	188,50	156,71	121,35
7	R 452A	73,16	60,94	47,11	146,33	121,87	94,23
8	R 452B	125,29	101,29	75,47	250,58	202,58	150,94
9	R 454A	100,54	83,54	64,65	201,09	167,08	129,31
10	R 454B	127,66	103,23	76,96	255,31	206,46	153,91
11	R1270	163,51	133,32	99,88	327,02	266,64	199,76
12	R290	158,28	129,62	97,57	316,56	259,23	195,13
13	R 744	153,27	127,06	87,26	306,53	254,12	174,51
14	R469A	142,42	121,14	96,93	284,84	242,28	193,86

Ergebnisse zu den Extremwerten des einstufiger Kreislauf

Ergebnissezu I, t_c = 55 °C

	Kältemittel	COP_{ideal}	COP_{real}	t_{V2} in °C	t_{V2} in °C	Druckverhältnis
				ideal	real	p_c/p_0
1	R404A	1,026	0,513	118,14	179,82	15,79990743
2	R 32	1,324	0,662	205,49	330,80	15,89971386
3	R 407F	1,177	0,589	152,42	242,05	21,41190156
4	R 410A	1,203	0,602	158,06	249,07	15,76534692
5	R 448A	1,139	0,570	142,89	225,32	20,66616312
6	R 449A	1,143	0,571	140,83	221,60	20,35569011
7	R 452A	1,003	0,502	121,62	186,87	18,13954737
8	R 452B	1,260	0,630	171,92	273,33	16,26170867
9	R 454A	1,127	0,563	144,30	226,67	19,35865419
10	R 454B	1,266	0,633	173,19	275,56	16,34557662
11	R1270	1,301	0,650	133,17	207,51	13,1015247
12	R290	1,321	0,660	120,52	186,65	13,89808425
13	R 744	0,641	0,321	215,23	345,22	9,979882622
14	R469A	0,773	0,387	198,71	317,73	17,62318953

Ergebnissezu II, t_c = 35 °C

	Kältemittel	COP_{ideal}	COP_{real}	t_{V2} in °C	t_{V2} in °C	Druckverhältnis
				ideal	real	p_c/p_0
1	R404A	1,813	0,907	98,53	152,40	9,898374182
2	R 32	1,997	0,998	169,88	276,28	9,891742539
3	R 407F	1,815	0,907	129,02	207,47	13,36983288
4	R 410A	1,933	0,967	131,12	209,06	9,832444362
5	R 448A	1,791	0,896	120,96	193,26	12,96909344
6	R 449A	1,804	0,902	119,10	189,91	12,75941826
7	R 452A	1,734	0,867	102,41	159,85	11,43219925
8	R 452B	1,949	0,975	142,94	229,81	10,16761896
9	R 454A	1,779	0,889	121,94	194,09	12,22978487
10	R 454B	1,950	0,975	144,06	231,79	10,22428052
11	R1270	2,057	1,028	111,15	175,67	8,418338872
12	R290	2,066	1,033	101,42	159,08	8,875047783
13	R 744	1,239	0,619	182,98	294,12	7,235414901
14	R469A	1,366	0,683	172,18	277,70	12,25156104

Ergebnissezu III, t_c = 15 °C

	Kältemittel	COP_{ideal}	COP_{real}	t_{V2} in °C	t_{V2} in °C	Druckverhältnis
				ideal	real	p_c/p_0
1	R404A	3,051	1,526	78,38	121,77	5,836854663
2	R 32	3,133	1,567	131,72	215,64	5,785586137
3	R 407F	2,811	1,405	104,13	168,46	7,818067532
4	R 410A	3,121	1,561	102,69	164,50	5,768660607
5	R 448A	2,804	1,402	97,74	157,08	7,621905192
6	R 449A	2,834	1,417	96,14	154,17	7,491180194
7	R 452A	2,856	1,428	82,47	129,44	6,755451533
8	R 452B	3,082	1,541	112,09	181,20	5,972537101
9	R 454A	2,793	1,396	98,28	157,39	7,244026971
10	R 454B	3,074	1,537	113,02	182,87	6,007396395
11	R1270	3,291	1,646	87,91	139,59	5,100671107
12	R290	3,298	1,649	81,07	127,54	5,330728354
13	R 744	2,474	1,237	132,99	213,51	4,230761126
14	R469A	2,130	1,065	142,13	230,88	7,922347633

Anhang 11

Betriebsbedingungen des weistufiger Kältekreislauf

Verflüssigungstemperatur I	45	°C
Verflüssigungstemperatur II	35	°C
Verflüssigungstemperatur III	25	°C
Unterkühlung	2	K
VDA Ansaugtemperatur Luftseitig bzw. Kühlraumtemperatur	-20	°C
Überhitzung des Kältemittel am Ausgang des Verdampfers	6	K
Verdichteransaugtemperatur	0	°C
Druckabfall Saugleitung bis zum Verdichter	2	k
Wirkungsgrad Niederdruckverdichters bzw. Druckstufe 1	55	%
Wirkungsgrad Hochdruckverdichters bzw. Druckstufe 2	55	%

Ergebnisse zum Hochdruck I 45 °C

	Kältemittel	Hochdruck in bar	Mitteldruck in bar	Niederdruck des Verdampfersin bar	Niederdruck am Verdichter in bar	reale Heißgastemperatur Stufe 1 in °C	reale Heißgastemperatur Stufe 2 in °C	spezifische Verdampfungs-enthalpie in kJ/kg	spezifische Verdichterarbeit 1. Stufe in kJ/kg	spezifische Verdichterarbeit 2. Stufe in kJ/(kg	spezifischer Massenstrom 2. Stufe ($kg_{HD\ Stufe}/kg_{ND\ Stufe}$)	korrigierte spezifische Verdichterarbeit 2. Stufe	Gesamtverdichterarbeit 1. und 2. Stufe in kJ/kg	COP Wert	COP Werte bei abkühlung des Heißgases auf t_{cu}	Druckverhältnis Gesamt	Druckverhältnis pro Stufe
1	R404A	20,59	6,59	2,29	2,11	59	64	152,91	47,72	40,19	2,14	86,19	133,90	1,14	1,20	9,772	3,126
2	R 32	27,95	8,92	3,09	2,85	111	106	308,28	95,82	83,62	1,81	151,69	247,51	1,25	1,38	9,809	3,132
3	R 407F	21,65	6,02	1,83	1,67	82	86	207,66	66,65	58,75	1,96	115,02	181,67	1,14	1,24	12,93	3,5959
4	R 410A	27,34	8,76	3,04	2,81	83	83	212,26	65,93	56,18	1,98	110,98	176,91	1,20	1,31	9,741	3,1211
5	R 448A	21,16	5,97	1,84	1,68	76	81	193,30	62,12	54,47	2,00	108,77	170,88	1,13	1,22	12,57	3,5454
6	R 449A	20,87	5,93	1,84	1,68	75	80	190,84	60,97	53,37	2,00	106,62	167,60	1,14	1,23	12,39	3,5192
7	R 452A	21,44	6,41	2,08	1,92	62	68	150,87	48,19	41,22	2,15	88,52	136,71	1,10	1,16	11,18	3,3441
8	R 452B	26,11	8,23	2,81	2,60	92	91	248,04	77,49	67,13	1,90	127,23	204,72	1,21	1,33	10,06	3,1717
9	R 454A	21,93	6,35	2,00	1,84	77	82	200,21	64,94	56,61	2,01	113,59	178,53	1,12	1,21	11,91	3,4517
10	R 454B	25,86	8,13	2,77	2,56	93	92	252,35	78,92	68,52	1,89	129,29	208,21	1,21	1,33	10,11	3,1801
11	R1270	18,51	6,40	2,38	2,21	71	75	352,39	105,62	94,01	1,84	172,89	278,51	1,27	1,35	8,375	2,894
12	R290	15,34	5,17	1,89	1,75	64	68	345,95	103,08	92,32	1,84	169,98	273,06	1,27	1,34	8,791	2,9649
13	R 744	120,00	42,09	15,77	14,76	118	107	225,41	98,50	73,68	2,93	215,79	314,29	0,72	0,86	8,128	2,851
14	R469A	54,91	16,11	5,12	4,73	108	110	289,74	89,17	75,64	2,46	186,20	275,38	1,05	1,20	11,61	3,408

Ergebnisse zum Hochdruck II 35 °C

	Kältemittel	Hochdruck in bar	Mitteldruck in bar	Niederdruck des Verdampfersin bar	Niederdruck am Verdichter in bar	reale Heißgastemperatur Stufe 1 in °C	reale Heißgastemperatur Stufe 2 in °C	spezifische Verdampfungs-enthalpie in kJ/kg	spezifische Verdichterarbeit 1. Stufe in kJ/kg	spezifische Verdichterarbeit 2. Stufe in kJ/(kg	spezifischer Massenstrom 2. Stufe ($kg_{HD\ Stufe}/kg_{ND\ Stufe}$)	korrigierte spezifische Verdichterarbeit 2. Stufe	Gesamtverdichterarbeit 1. und 2. Stufe in kJ/kg	COP Wert	COP Werte bei abkühlung des Heißgases auf t_{cu}	Druckverhältnis Gesamt	Druckverhältnis pro Stufe
1	R404A	16,20	5,84	2,29	2,11	52,68	52,96	158,23	42,54	36,39	1,88	68,36	110,90	1,43	1,51	7,685	2,7722
2	R 32	21,90	7,90	3,09	2,85	99,29	89,99	315,01	84,64	74,21	1,65	122,75	207,40	1,52	1,68	7,686	2,7724
3	R 407F	16,99	5,33	1,83	1,67	74,32	73,69	212,92	59,96	53,24	1,77	94,22	154,18	1,38	1,50	10,14	3,185
4	R 410A	21,45	7,76	3,04	2,81	73,76	69,38	218,10	58,49	50,31	1,76	88,77	147,26	1,48	1,61	7,643	2,7646
5	R 448A	16,64	5,29	1,84	1,68	68,77	69,21	198,47	55,92	49,45	1,80	88,85	144,77	1,37	1,48	9,886	3,1442
6	R 449A	16,40	5,26	1,84	1,68	67,52	67,92	196,01	54,85	48,43	1,80	87,00	141,85	1,38	1,49	9,735	3,1202
7	R 452A	16,90	5,69	2,08	1,92	55,71	57,47	155,78	43,28	37,52	1,89	70,92	114,21	1,36	1,45	8,816	2,9691
8	R 452B	20,51	7,30	2,81	2,60	82,02	77,31	254,18	68,81	60,03	1,71	102,87	171,68	1,48	1,62	7,901	2,8109
9	R 454A	17,31	5,65	2,00	1,84	69,18	69,77	205,59	58,42	51,38	1,80	92,63	151,05	1,36	1,48	9,403	3,0664
10	R 454B	20,31	7,21	2,77	2,56	82,85	78,22	258,52	70,10	61,28	1,71	104,68	174,78	1,48	1,62	7,944	2,8185
11	R1270	14,74	5,71	2,38	2,21	63,33	63,25	361,85	93,80	84,09	1,67	140,24	234,05	1,55	1,65	6,67	2,5826
12	R290	12,18	4,61	1,89	1,75	57,37	56,91	355,51	91,68	82,59	1,68	138,56	230,24	1,54	1,64	6,978	2,6416
13	R 744	87,00	35,84	15,77	14,76	98,70	85,56	241,32	81,92	63,17	2,51	158,43	240,35	1,00	1,17	5,893	2,4276
14	R469A	45,19	14,62	5,12	4,73	99,37	97,71	295,04	81,48	69,69	2,10	146,30	227,78	1,30	1,47	9,558	3,0916

Ergebnisse zum Hochdruck III 25 °C

	Kältemittel	Hochdruck in bar	Mitteldruck in bar	Niederdruck des Verdampfersin bar	Niederdruck am Verdichter in bar	reale Heißgastemperatur Stufe 1 in °C	reale Heißgastemperatur Stufe 2 in °C	spezifische Verdampfungs-enthalpie in kJ/kg	spezifische Verdichterarbeit 1. Stufe in kJ/kg	spezifische Verdichterarbeit 2. Stufe in kJ/(kg	spezifischer Massenstrom 2. Stufe ($kg_{HD\ Stufe}/kg_{ND\ Stufe}$)	korrigierte spezifische Verdichterarbeit 2. Stufe	Gesamtverdichterarbeit 1. und 2. Stufe in kJ/kg	COP Wert	COP Werte bei abkühlung des Heißgases auf t_{cu}	Druckverhältnis Gesamt	Druckverhältnis pro Stufe
1	R404A	12,55	5,14	2,29	2,11	46,05	41,58	163,64	37,07	32,08	1,68	54,02	91,09	1,80	1,91	5,953	2,44
2	R 32	16,90	6,94	3,09	2,85	86,39	73,69	321,86	73,01	64,21	1,52	97,83	170,84	1,88	2,06	5,93	2,4352
3	R 407F	13,11	4,69	1,83	1,67	65,95	61,16	218,31	52,90	47,21	1,62	76,47	129,37	1,69	1,84	7,83	2,7981
4	R 410A	16,57	6,82	3,04	2,81	64,29	55,80	224,05	50,68	43,92	1,60	70,35	121,02	1,85	2,00	5,906	2,4303
5	R 448A	12,88	4,66	1,84	1,68	61,02	57,13	203,78	49,36	43,92	1,64	72,00	121,36	1,68	1,82	7,649	2,7657
6	R 449A	12,69	4,62	1,84	1,68	59,85	55,90	201,32	48,37	42,99	1,64	70,41	118,78	1,69	1,83	7,529	2,7439
7	R 452A	13,11	5,01	2,08	1,92	49,18	46,22	160,81	38,07	33,34	1,70	56,65	94,72	1,70	1,82	6,839	2,6151
8	R 452B	15,86	6,42	2,81	2,60	71,68	63,00	260,45	59,72	52,37	1,57	82,15	141,87	1,84	2,00	6,11	2,4718
9	R 454A	13,44	4,98	2,00	1,84	61,33	57,55	211,12	51,52	45,62	1,64	74,95	126,47	1,67	1,81	7,303	2,7024
10	R 454B	15,71	6,34	2,77	2,56	72,44	63,84	264,83	60,86	53,46	1,57	83,69	144,55	1,83	1,99	6,144	2,4787
11	R1270	11,57	5,06	2,38	2,21	55,30	50,66	371,47	81,35	73,26	1,53	112,24	193,58	1,92	2,05	5,235	2,2879
12	R290	9,52	4,08	1,89	1,75	50,19	45,33	365,28	79,63	71,97	1,55	111,19	190,83	1,91	2,04	5,455	2,3356
13	R 744	64,34	30,82	15,77	14,76	81,05	65,17	254,85	66,88	52,82	2,04	107,97	174,85	1,46	1,64	4,358	2,0877
14	R469A	36,62	13,16	5,12	4,73	89,86	84,79	300,47	73,29	63,16	1,86	117,17	190,47	1,58	1,78	7,745	2,7831

Berechnungen zum zweistufigen Kältekreislauf

Betriebsbedingungen

Verflüssigungstemperatur I	45	°C	318,15	K		
Verflüssigerausgangstemperatur I	43	°C	316,15	K		
Verflüssigungstemperatur II	35	°C	308,15	K		
Verflüssigerausgangstemperatur II	33	°C	306,15	K		
Verflüssigungstemperatur III	25	°C	298,15	K		
Verflüssigerausgangstemperatur III	23	°C	296,15	K		
Unterkühlung	2	K	2	K	Normalzust.	
Verdampfungstemperatur	-27	°C	246,15	K		
Überhitzung	6	K	6	K	--> Quelle	
Verdampferaustrittstemperatur KM	-21	°C	252,15	K		
Verdichteransaugtemperatur	0	°C	273,15	K	--> Annahme	
VDA Ansaugtemperatur Luft	-20	°C	253,15	K		
Druckabfall Saugleitung bis zum VDI	2	k	2	K	--> Annahme	
Saugdruck am VDI	-29	°C	244,15	K	--> Quelle+Neuere	
Wirkungsgrad ND Verdichter 1. Sufe	55	%	0,55		Annahmen finden	
Wirkungsgrad HD Verdichter 2. Sufe	55	%	0,55			

Zwischenwerte

				Variable Hochdrücke I, II und III		
	Kältemittel	TIL Bezeichnung	p_0 in Pa	p_c I	p_c II	p_c III
1	R404A	Refprop.R404A.MIX	228556	2059284	1619535	1254580
2	R 32	Refprop.R32.fld	308963	2794777	2189831	1689619
3	R 407F	Refprop.R407F.MIX	182936	2165116	1698613	1311022
4	R 410A	Refprop.R410A.MIX	304262	2733533	2144850	1657437
5	R 448A	Refprop.R448A.MIX	183646	2115975	1664178	1287641
6	R 449A	Refprop.R449A.MIX	183755	2086739	1640293	1268519
7	R 452A	Refprop.R452A.MIX	208398	2143963	1690105	1311121
8	R 452B	Refprop.R452B.MIX	281467	2611209	2050874	1585907
9	R 454A	Refprop.R454A.MIX	200305	2193443	1731064	1344427
10	R 454B	Refprop.R454B.MIX	277249	2585528	2031062	1570811
11	R1270	VDIWA2006.propene	238231	1851208	1474277	1157055
12	R290	Refprop.PROPANE.FLD	188559	1534312	1217882	952073
13	R 744	Refprop.CO2.FLD	1577047	12000000	8700000	6434244
14	R469A Bestandteile	Prozentanteile	512054	5491143	4518953	3662007
	Refprop.CO2.FLD	0,35				
	Refprop.R32.fld	0,325				
	Refprop.R125.fld	0,325				

		Variabler Mitteldruck in Pa			t_0 am VDI	$h_{1VDI\ ND}$	$s_{VDI\ ND}$
	Kältemittel	I	II	III	in Pa	in kJ/kg	in J/kgK
1	R404A	658755	584199	514180	210733	373,31	1786
2	R 32	892332	789875	693821	284909	533,80	2374
3	R 407F	602108	533312	468532	167443	424,44	2041
4	R 410A	875837	775817	681992	280622	436,69	2041
5	R 448A	596824	529287	465574	168338	413,32	2020
6	R 449A	592951	525709	462310	168488	411,11	1999
7	R 452A	641123	569232	501365	191719	370,26	1786
8	R 452B	823274	729614	641597	259566	476,95	2207
9	R 454A	635463	564525	497503	184100	426,34	2000
10	R 454B	813037	720605	633721	255665	482,07	2214
11	R1270	639680	570853	505722	221039	590,86	2609
12	R290	517487	461047	407641	174536	586,85	2592
13	R 744	4209011	3583844	3082039	1476314	467,68	2112
14	R469A	1611267	1461689	1315817	472794	450,53	2208

		w_{real} 1. Stufe in kJ/kg			Heißgastemp. t_{VDI2} 1.Stufe real		
		I	II	III	I	II	III
1	R404A	47,72	42,54	37,07	58,92	52,68	46,05
2	R 32	95,82	84,64	73,01	111,46	99,29	86,39
3	R 407F	66,65	59,96	52,90	82,17	74,32	65,95
4	R 410A	65,93	58,49	50,68	82,70	73,76	64,29
5	R 448A	62,12	55,92	49,36	76,03	68,77	61,02
6	R 449A	60,97	54,85	48,37	74,71	67,52	59,85
7	R 452A	48,19	43,28	38,07	61,85	55,71	49,18
8	R 452B	77,49	68,81	59,72	91,77	82,02	71,68
9	R 454A	64,94	58,42	51,52	76,55	69,18	61,33
10	R 454B	78,92	70,10	60,86	92,66	82,85	72,44
11	R1270	105,62	93,80	81,35	70,87	63,33	55,30
12	R290	103,08	91,68	79,63	64,09	57,37	50,19
13	R 744	98,50	81,92	66,88	117,90	98,70	81,05
14	R469A	89,17	81,48	73,29	108,22	99,37	89,86

	Kältemittel	s_{VDI} 2. Stufe in J/kgK			q_0 bei variablem Mitteldruck in kJ/kg		
		I	II	III	I	II	III
1	R404A	1671	1672	1674	152,91	158,23	163,64
2	R 32	2144	2158	2172	308,28	315,01	321,86
3	R 407F	1894	1899	1904	207,66	212,92	218,31
4	R 410A	1875	1883	1891	212,26	218,10	224,05
5	R 448A	1883	1887	1892	193,30	198,47	203,78
6	R 449A	1864	1868	1872	190,84	196,01	201,32
7	R 452A	1677	1679	1680	150,87	155,78	160,81
8	R 452B	2020	2030	2039	248,04	254,18	260,45
9	R 454A	1856	1860	1865	200,21	205,59	211,12
10	R 454B	2025	2034	2044	252,35	258,52	264,83
11	R1270	2386	2392	2398	352,39	361,85	371,47
12	R290	2369	2373	2378	345,95	355,51	365,28
13	R 744	1802	1839	1870	225,41	241,32	254,85
14	R469A	1998	2008	2018	289,74	295,0435	300,474

	Kältemittel	Enthalpiedifferenz durch Flashgas MDF in kJ/kg			Enthalpiedifferenz durch Kühlung des HG ND VDI in kJ/kg		
		I	II	III	I	II	III
1	R404A	61,68	50,61	40,54	55,25	51,95	48,47
2	R 32	76,66	62,77	50,18	113,82	103,31	92,51
3	R 407F	68,76	57,42	46,97	74,11	68,98	63,60
4	R 410A	67,44	55,07	43,92	79,25	72,93	66,39
5	R 448A	67,75	56,54	46,22	68,69	64,19	59,47
6	R 449A	67,11	55,95	45,68	67,59	63,18	58,54
7	R 452A	61,92	51,27	41,54	53,75	50,67	47,42
8	R 452B	71,91	59,03	47,35	91,13	83,61	75,82
9	R 454A	70,17	58,46	47,69	72,23	67,44	62,41
10	R 454B	72,49	59,57	47,82	92,48	84,84	76,91
11	R1270	109,45	89,22	70,86	113,64	105,62	97,16
12	R290	108,62	89,52	71,80	111,91	104,70	97,04
13	R 744	88,32	89,29	75,11	140,64	119,35	101,36
14	R469A	103,76	85,53	70,33	104,64	97,34631	89,71824

					benötigte Enthalpi H in kJ			
	Kältemittel	Gesamte VDA Enthalpie bei p_m in kJ/kg			$dh_{ges,pm} + dh_{HG\ kühl}$			
		I	II	III	I		II	III
1	R404A	163,86	167,29	170,71	219,11		219,24	219,18
2	R 32	310,65	316,70	322,73	424,47		420,02	415,24
3	R 407F	217,93	221,62	225,33	292,04		290,60	288,93
4	R 410A	217,82	222,53	227,21	297,07		295,46	293,60
5	R 448A	204,61	208,08	211,57	273,30		272,28	271,03
6	R 449A	202,10	205,56	209,03	269,70		268,75	267,58
7	R 452A	162,69	165,77	168,84	216,44		216,44	216,26
8	R 452B	253,99	258,98	263,95	345,13		342,59	339,77
9	R 454A	211,64	215,29	218,95	283,86		282,73	281,35
10	R 454B	258,48	263,48	268,47	350,96		348,32	345,38
11	R1270	375,33	381,00	386,62	488,97		486,62	483,78
12	R290	370,80	376,17	381,55	482,71		480,87	478,59
13	R 744	207,03	227,66	244,14	347,68		347,00	345,50
14	R469A	246,34	251,87	257,46	350,98		349,22	347,18
	Kältemittel	spezifischer Gesamtassenstrom HD Kreis (Korrekturfaktor w_{real} HD VDI)			spezifischer Massenstrom durch Flashgas undKühlung HG VDI Stufe 1			
		I	II	III	I		II	III
1	R404A	2,14	1,88	1,68	1,14		0,88	0,68
2	R 32	1,81	1,65	1,52	0,81		0,65	0,52
3	R 407F	1,96	1,77	1,62	0,96		0,77	0,62
4	R 410A	1,98	1,76	1,60	0,98		0,76	0,60
5	R 448A	2,00	1,80	1,64	1,00		0,80	0,64
6	R 449A	2,00	1,80	1,64	1,00		0,80	0,64
7	R 452A	2,15	1,89	1,70	1,15		0,89	0,70
8	R 452B	1,90	1,71	1,57	0,90		0,71	0,57
9	R 454A	2,01	1,80	1,64	1,01		0,80	0,64
10	R 454B	1,89	1,71	1,57	0,89		0,71	0,57
11	R1270	1,84	1,67	1,53	0,84		0,67	0,53
12	R290	1,84	1,68	1,55	0,84		0,68	0,55
13	R 744	2,93	2,51	2,04	1,93		1,51	1,04
14	R469A	2,46	2,10	1,86	1,46		1,10	0,86
					Enthalpie HD VDI Austritt			
	Kältemittel	Ansaugenthalpie HD VDI in kJ/kg			bei Isentroper Verdichtung			
		I	II	III	I		II	III
1	R404A	365,78	363,90	361,91	387,88		383,92	379,55
2	R 32	515,80	515,13	514,30	561,79		555,95	549,61
3	R 407F	416,98	415,41	413,73	449,29		444,69	439,69
4	R 410A	423,38	422,25	420,98	454,28		449,92	445,13
5	R 448A	406,74	405,04	403,21	436,70		432,23	427,37
6	R 449A	404,49	402,77	400,93	433,84		429,41	424,57
7	R 452A	364,69	362,86	360,91	387,36		383,50	379,25
8	R 452B	463,30	462,15	460,85	500,22		495,17	489,65
9	R 454A	419,05	417,32	415,46	450,19		445,58	440,55
10	R 454B	468,51	467,33	466,02	506,19		501,04	495,42
11	R1270	582,83	579,04	575,04	634,54		625,29	615,33
12	R290	578,02	573,83	569,44	628,80		619,26	609,02
13	R 744	425,53	430,26	433,20	466,05		465,00	462,25
14	R469A	435,06	434,66	434,10	476,66		472,9896	468,8395

	Kältemittel	w_{real} VDI 2.Stufe in kJ/kg			korrigierte w_{real} VDI Stufe 2 in kJ/kg		
		I	II	III	I	II	III
1	R404A	40,19	36,39	32,08	86,19	68,36	54,02
2	R 32	83,62	74,21	64,21	151,69	122,75	97,83
3	R 407F	58,75	53,24	47,21	115,02	94,22	76,47
4	R 410A	56,18	50,31	43,92	110,98	88,77	70,35
5	R 448A	54,47	49,45	43,92	108,77	88,85	72,00
6	R 449A	53,37	48,43	42,99	106,62	87,00	70,41
7	R 452A	41,22	37,52	33,34	88,52	70,92	56,65
8	R 452B	67,13	60,03	52,37	127,23	102,87	82,15
9	R 454A	56,61	51,38	45,62	113,59	92,63	74,95
10	R 454B	68,52	61,28	53,46	129,29	104,68	83,69
11	R1270	94,01	84,09	73,26	172,89	140,24	112,24
12	R290	92,32	82,59	71,97	169,98	138,56	111,19
13	R 744	73,68	63,17	52,82	215,79	158,43	107,97
14	R469A	75,64	69,69	63,16	186,20	146,30	117,17

	Kältemittel	spez. VDI Arbeit w_{gesamt} in kJ/kg			Verdichtungsendtemperatur HD VDI (Stufe 2) in °C		
		I	II	III	I	II	III
1	R404A	133,90	110,90	91,09	64,13	52,96	41,58
2	R 32	247,51	207,40	170,84	105,60	89,99	73,69
3	R 407F	181,67	154,18	129,37	85,78	73,69	61,16
4	R 410A	176,91	147,26	121,02	82,51	69,38	55,80
5	R 448A	170,88	144,77	121,36	80,88	69,21	57,13
6	R 449A	167,60	141,85	118,78	79,54	67,92	55,90
7	R 452A	136,71	114,21	94,72	68,46	57,47	46,22
8	R 452B	204,72	171,68	141,87	91,08	77,31	63,00
9	R 454A	178,53	151,05	126,47	81,59	69,77	57,55
10	R 454B	208,21	174,78	144,55	92,05	78,22	63,84
11	R1270	278,51	234,05	193,58	75,41	63,25	50,66
12	R290	273,06	230,24	190,83	68,06	56,91	45,33
13	R 744	314,29	240,35	174,85	106,94	85,56	65,17
14	R469A	275,38	227,78	190,47	109,90	97,71	84,79

	Kältemittel	COP Gesamt		
		I	II	III
1	R404A	1,142	1,427	1,796
2	R 32	1,246	1,519	1,884
3	R 407F	1,143	1,381	1,687
4	R 410A	1,200	1,481	1,851
5	R 448A	1,131	1,371	1,679
6	R 449A	1,139	1,382	1,695
7	R 452A	1,104	1,364	1,698
8	R 452B	1,212	1,481	1,836
9	R 454A	1,121	1,361	1,669
10	R 454B	1,212	1,479	1,832
11	R1270	1,265	1,546	1,919
12	R290	1,267	1,544	1,914
13	R 744	0,717	1,004	1,458
14	R469A	1,052	1,295	1,578

Verbesserung der COP Werte durch zwischenkühlung des Heißgases der 1. Verdichtungsstufe auf den Wert t_{cu} , in der MDF wird dadurch der Dampfanteil geringer

	Kältemittel	Enthalpiedifferenz Heißgaskühlung bei vorheriger abkühlung auf t_{cu} in kJ/kg			Korrekturfaktor w_{real} HD VDI mit zwischenkühlung		
		I	II	III	I	II	III
1	R404A	39,58	32,88	26,49	1,99	1,72	1,51
2	R 32	44,42	37,11	30,11	1,52	1,39	1,29
3	R 407F	37,09	30,52	24,23	1,71	1,54	1,40
4	R 410A	41,04	34,25	27,76	1,72	1,53	1,39
5	R 448A	37,10	30,50	24,20	1,77	1,57	1,43
6	R 449A	37,23	30,63	24,33	1,77	1,58	1,43
7	R 452A	36,19	29,83	23,78	1,97	1,71	1,51
8	R 452B	42,08	35,02	28,27	1,63	1,47	1,35
9	R 454A	38,64	31,75	25,19	1,77	1,58	1,43
10	R 454B	42,18	35,09	28,31	1,62	1,46	1,35
11	R1270	65,34	54,15	43,56	1,66	1,49	1,36
12	R290	72,19	59,78	48,05	1,69	1,52	1,39
13	R 744	55,84	46,29	37,75	2,21	1,98	1,67
14	R469A	39,60	31,87	24,48	2,01	1,71	1,51

	Kältemittel	gesamte spez. VDI Arbeit mit Heißgaskühlung in kJ/kg			COP Werte mit Heißgaszwischen-kühlung		
		I	II	III	I	II	III
1	R404A	127,74	104,96	85,67	1,20	1,51	1,91
2	R 32	222,71	188,05	156,14	1,38	1,68	2,06
3	R 407F	167,09	141,71	118,95	1,24	1,50	1,84
4	R 410A	162,64	135,63	111,77	1,31	1,61	2,00
5	R 448A	158,31	133,77	111,99	1,22	1,48	1,82
6	R 449A	155,59	131,31	109,78	1,23	1,49	1,83
7	R 452A	129,53	107,38	88,53	1,16	1,45	1,82
8	R 452B	186,63	157,09	130,38	1,33	1,62	2,00
9	R 454A	165,09	139,36	116,56	1,21	1,48	1,81
10	R 454B	189,68	159,82	132,77	1,33	1,62	1,99
11	R1270	261,43	219,21	181,15	1,35	1,65	2,05
12	R290	259,07	217,29	179,45	1,34	1,64	2,04
13	R 744	261,65	207,00	154,97	0,86	1,17	1,64
14	R469A	240,87	200,35	168,45	1,20	1,47	1,78

Anhang 12

Betriebsbedingungen des zweistufigen Kältekreislaufs bei extremen Bedingungen

Verflüssigungstemperatur I	55	°C
Verflüssigungstemperatur II	35	°C
Verflüssigungstemperatur III	15	°C
Unterkühlung	2	K
VDA Ansaugtemperatur Luftseitig bzw. Kühlraumtemperatur	-20	°C
Überhitzung des Kältemittel am Ausgang des Verdampfers	12	K
Verdichteransaugtemperatur	20	°C
Druckabfall Saugleitung bis zum Verdichter	2	k
Wirkungsgrad Niederdruckverdichters bzw. Druckstufe 1	55	%
Wirkungsgrad Hochdruckverdichters bzw. Druckstufe 2	50	%

Ergebnisse zum Hochdruck I 55 °C

	Kältemittel	Hochdruck in bar	Mitteldruck in bar	Niederdruck des Verdampfersin bar	Niederdruck am Verdichter in bar	reale Heißgastemperatur Stufe 1 in °C	reale Heißgastemperatur Stufe 2 in °C	spezifische Verdampfungs-enthalpie in kJ/kg	spezifische Verdichterarbeit 1. Stufe in kJ/kg	spezifische Verdichterarbeit 2. Stufe in kJ/(kg	spezifischer Massenstrom 2. Stufe ($kg_{HD\ Stufe}/kg_{ND\ Stufe}$)	korrigierte spezifische Verdichterarbeit 2. Stufe	Gesamtverdichterarbeit 1. und 2. Stufe in kJ/kg	COP Wert	COP Werte bei abkühlung des Heißgases auf t_{cu}	Druckverhältnis Gesamt	Druckverhältnis pro Stufe
1	R404A	25,85	6,50	1,78	1,64	93	81	154,86	64,14	53,05	3,02	160,16	224,31	0,69	0,78	15,8	3,9749
2	R 32	35,20	8,83	2,41	2,21	162	137	311,84	129,82	113,52	2,26	256,61	386,43	0,81	0,96	15,9	3,9874
3	R 407F	27,20	5,88	1,40	1,27	122	108	210,12	88,24	77,67	2,53	196,51	284,75	0,74	0,86	21,41	4,6273
4	R 410A	34,39	8,66	2,38	2,18	125	105	215,05	89,09	75,37	2,60	195,89	284,98	0,75	0,88	15,77	3,9706
5	R 448A	26,52	5,83	1,41	1,28	114	101	195,61	82,17	71,75	2,62	187,86	270,03	0,72	0,84	20,67	4,546
6	R 449A	26,17	5,80	1,41	1,29	112	99	193,11	80,73	70,33	2,63	184,61	265,34	0,73	0,84	20,36	4,5117
7	R 452A	26,82	6,30	1,61	1,48	96	85	152,77	64,02	54,03	2,99	161,30	225,33	0,68	0,77	18,14	4,2591
8	R 452B	32,80	8,13	2,20	2,02	136	116	250,98	104,31	90,12	2,42	218,53	322,84	0,78	0,91	16,26	4,0326
9	R 454A	27,40	6,23	1,55	1,42	115	102	202,60	85,98	74,54	2,64	196,58	282,56	0,72	0,83	19,36	4,3998
10	R 454B	32,47	8,03	2,16	1,99	137	118	255,30	106,17	91,97	2,41	221,38	327,55	0,78	0,91	16,35	4,043
11	R1270	22,94	6,34	1,90	1,75	107	96	354,72	141,13	125,16	2,38	298,14	439,26	0,81	0,92	13,1	3,6196
12	R290	19,07	5,12	1,49	1,37	99	86	348,71	137,48	122,78	2,38	292,55	430,03	0,81	0,91	13,9	3,728
13	R 744	120,00	37,99	12,89	12,02	160	121	241,14	122,56	92,30	5,20	480,36	602,92	0,40	0,52	9,98	3,1591
14	R469A	65,00	15,48	4,01	3,69	153	134	292,76	116,49	98,84	3,59	354,73	471,22	0,62	0,77	17,62	4,198

Ergebnisse zum Hochdruck II 35 °C

	Kältemittel	Hochdruck in bar	Mitteldruck in bar	Niederdruck des Verdampfersin bar	Niederdruck am Verdichter in bar	reale Heißgastemperatur Stufe 1 in °C	reale Heißgastemperatur Stufe 2 in °C	spezifische Verdampfungs-enthalpie in kJ/kg	spezifische Verdichterarbeit 1. Stufe in kJ/kg	spezifische Verdichterarbeit 2. Stufe in kJ/(kg	spezifischer Massenstrom 2. Stufe ($kg_{HD\ Stufe}/kg_{ND\ Stufe}$)	korrigierte spezifische Verdichterarbeit 2. Stufe	Gesamtverdichterarbeit 1. und 2. Stufe in kJ/kg	COP Wert	COP Werte bei abkühlung des Heißgases auf t_{cu}	Druckverhältnis Gesamt	Druckverhältnis pro Stufe
1	R404A	16,20	5,15	1,78	1,64	80,88	58,76	164,96	52,85	45,18	2,21	99,72	152,57	1,08	1,23	9,898	3,1462
2	R 32	21,90	6,96	2,41	2,21	137,39	105,30	324,63	105,31	92,84	1,84	171,17	276,49	1,17	1,36	9,892	3,1451
3	R 407F	16,99	4,65	1,40	1,27	106,08	83,62	220,06	73,76	65,90	2,02	132,90	206,66	1,06	1,23	13,37	3,6565
4	R 410A	21,45	6,84	2,38	2,18	106,59	79,19	226,16	72,79	62,75	2,01	125,98	198,77	1,14	1,31	9,832	3,1357
5	R 448A	16,64	4,62	1,41	1,28	99,50	77,98	205,39	68,77	61,12	2,06	125,97	194,75	1,05	1,22	12,97	3,6013
6	R 449A	16,40	4,59	1,41	1,29	98,01	76,47	202,91	67,48	59,88	2,06	123,49	190,97	1,06	1,22	12,76	3,572
7	R 452A	16,90	5,00	1,61	1,48	84,16	63,66	162,06	53,39	46,35	2,21	102,56	155,95	1,04	1,19	11,43	3,3812
8	R 452B	20,51	6,43	2,20	2,02	116,16	88,81	262,65	85,37	74,77	1,93	144,59	229,97	1,14	1,32	10,17	3,1887
9	R 454A	17,31	4,95	1,55	1,42	99,88	78,48	212,79	71,86	63,47	2,07	131,27	203,12	1,05	1,21	12,23	3,4971
10	R 454B	20,31	6,35	2,16	1,99	117,08	89,89	267,03	86,93	76,30	1,93	146,99	233,92	1,14	1,32	10,22	3,1975
11	R1270	14,74	5,08	1,90	1,75	92,47	71,79	372,67	115,61	104,15	1,91	198,65	314,26	1,19	1,35	8,418	2,9014
12	R290	12,18	4,09	1,49	1,37	85,36	64,24	366,85	112,95	102,22	1,93	197,56	310,51	1,18	1,33	8,875	2,9791
13	R 744	87,00	32,34	12,89	12,02	139,38	98,41	256,03	103,60	79,89	2,85	227,86	331,47	0,77	0,96	7,235	2,6899
14	R469A	45,19	12,91	4,01	3,69	135,93	110,98	302,88	100,32	86,30	2,38	205,24	305,56	0,99	1,20	12,25	3,5002

Ergebnisse zum Hochdruck III 15 °C

	Kältemittel	Hochdruck in bar	Mitteldruck in bar	Niederdruck des Verdampfersin bar	Niederdruck am Verdichter in bar	reale Heißgastemperatur Stufe 1 in °C	reale Heißgastemperatur Stufe 2 in °C	spezifische Verdampfungs-enthalpie in kJ/kg	spezifische Verdichterarbeit 1. Stufe in kJ/kg	spezifische Verdichterarbeit 2. Stufe in kJ/(kg	spezifischer Massenstrom 2. Stufe ($kg_{HD\ Stufe}/kg_{ND\ Stufe}$)	korrigierte spezifische Verdichterarbeit 2. Stufe	Gesamtverdichterarbeit 1. und 2. Stufe in kJ/kg	COP Wert	COP Werte bei abkühlung des Heißgases auf t_{cu}	Druckverhältnis Gesamt	Druckverhältnis pro Stufe
1	R404A	9,55	3,95	1,78	1,64	66,83	35,48	175,47	40,29	35,10	1,78	62,57	102,86	1,71	1,94	5,837	2,416
2	R 32	12,81	5,32	2,41	2,21	109,68	70,52	337,97	78,75	69,55	1,57	109,08	187,83	1,80	2,04	5,786	2,4053
3	R 407F	9,93	3,55	1,40	1,27	88,22	57,44	230,56	57,66	51,85	1,69	87,85	145,51	1,58	1,82	7,818	2,7961
4	R 410A	12,58	5,24	2,38	2,18	86,26	50,80	237,71	54,90	47,81	1,66	79,53	134,43	1,77	2,01	5,769	2,4018
5	R 448A	9,78	3,54	1,41	1,28	82,95	52,86	215,72	53,80	48,23	1,72	82,98	136,78	1,58	1,81	7,622	2,7608
6	R 449A	9,63	3,52	1,41	1,29	81,66	51,50	213,23	52,70	47,18	1,72	81,15	133,85	1,59	1,83	7,491	2,737
7	R 452A	9,99	3,84	1,61	1,48	70,27	40,59	171,82	41,46	36,58	1,80	65,69	107,15	1,60	1,84	6,755	2,5991
8	R 452B	12,05	4,93	2,20	2,02	93,96	58,67	274,84	64,58	56,91	1,63	92,56	157,14	1,75	1,99	5,973	2,4439
9	R 454A	10,25	3,81	1,55	1,42	83,12	53,07	223,52	56,10	50,03	1,72	86,21	142,30	1,57	1,80	7,244	2,6915
10	R 454B	11,93	4,87	2,16	1,99	94,74	59,59	279,30	65,81	58,09	1,62	94,28	160,08	1,74	1,99	6,007	2,451
11	R1270	8,93	3,96	1,90	1,75	75,55	45,53	391,25	87,30	79,07	1,61	127,59	214,88	1,82	2,06	5,101	2,2585
12	R290	7,32	3,17	1,49	1,37	70,32	40,12	385,84	85,58	77,67	1,64	127,43	213,01	1,81	2,05	5,331	2,3088
13	R 744	50,87	24,73	12,89	12,02	105,64	60,64	278,14	73,35	58,37	1,94	113,26	186,61	1,49	1,75	4,231	2,0569
14	R469A	29,22	10,38	4,01	3,69	115,34	83,71	313,48	81,48	70,87	1,89	133,70	215,18	1,46	1,73	7,922	2,8147

Berechnungen zum zweistufigen Kältekreislauf bei extremen Bedingungen

Betriebsbedingungen								
Verflüssigungstemperatur I		55	°C	328,15	K			
Verflüssigerausgangstemperatur I		53	°C	326,15	K			
Verflüssigungstemperatur II		35	°C	308,15	K			
Verflüssigerausgangstemperatur II		33	°C	306,15	K			
Verflüssigungstemperatur III		15	°C	288,15	K			
Verflüssigerausgangstemperatur III		13	°C	286,15	K			
Unterkühlung		2	K	2	K	Normalzust.		
Verdampfungstemperatur		-33	°C	240,15	K			
Überhitzung		12	K	12	K	--> Quelle		
Verdampferaustrittstemperatur KM		-21	°C	252,15	K			
Verdichteransaugtemperatur		20	°C	293,15	K	--> Annahme		
VDA Ansaugtemperatur Luft		-20	°C	253,15	K			
Druckabfall Saugleitung bis zum VDI		2	k	2	K	--> Annahme		
Saugdruck am VDI		-35	°C	238,15	K	--> Quelle+Neuere		
Wirkungsgrad ND Verdichter 1. Sufe		55	%	0,55		Annahmen finden		
Wirkungsgrad HD Verdichter 2. Sufe		50	%	0,5				

Zwischenwerte

				Variable Hochdrücke I, II und III		
	Kältemittel	TIL Bezeichnung	p_0 in Pa	p_c I	p_c II	p_c III
1	R404A	Refprop.R404A.MIX	178308	2585122	1619535	955005
2	R 32	Refprop.R32.fld	241180	3519873	2189831	1280811
3	R 407F	Refprop.R407F.MIX	139549	2720343	1698613	993271
4	R 410A	Refprop.R410A.MIX	237622	3439053	2144850	1258376
5	R 448A	Refprop.R448A.MIX	140721	2651856	1664178	978033
6	R 449A	Refprop.R449A.MIX	140935	2616835	1640293	963032
7	R 452A	Refprop.R452A.MIX	161485	2681700	1690105	998707
8	R 452B	Refprop.R452B.MIX	219742	3280090	2050874	1204699
9	R 454A	Refprop.R454A.MIX	154767	2740120	1731064	1025355
10	R 454B	Refprop.R454B.MIX	216422	3247062	2031062	1193374
11	R1270	VDIWA2006.propene	189524	2294429	1474277	893265
12	R290	Refprop.PROPANE.FLD	148901	1907169	1217882	731511
13	R 744	Refprop.CO2.FLD	1289143	12000000	8700000	5087147
14	R469A Bestandteile	Prozentanteile	401290	6500263	4518953	2922135
	Refprop.CO2.FLD	0,35				
	Refprop.R32.fld	0,325				
	Refprop.R125.fld	0,325				

	Kältemittel	Variabler Mitteldruck in Pa			t_0 am VDI	$h_{1VDI\ ND}$	$s_{VDI\ ND}$
		I	II	III	in Pa	in kJ/kg	in J/kgK
1	R404A	650360	514764	395290	163616	391,60	1871
2	R 32	882739	696264	532490	221380	553,15	2481
3	R 407F	587890	464549	355237	127048	441,80	2130
4	R 410A	866138	684016	523930	218140	454,82	2133
5	R 448A	583338	462109	354260	128319	430,91	2108
6	R 449A	580007	459204	351857	128555	428,71	2086
7	R 452A	629647	499860	384247	147837	387,47	1867
8	R 452B	813397	643175	492946	201706	495,85	2305
9	R 454A	622776	494998	380964	141545	444,78	2091
10	R 454B	803139	635194	486893	198651	501,09	2313
11	R1270	633890	508120	395518	175127	622,40	2765
12	R290	511578	408808	316831	137225	620,88	2756
13	R 744	3798556	3234354	2473233	1202419	490,37	2228
14	R469A	1548420	1291047	1038182	368847	469,27	2307

		w_{real} 1. Stufe in kJ/kg			Heißgastemp. t_{VDI2} 1.Stufe real			
		I	II	III	I		II	III
1	R404A	64,14	52,85	40,29	93,37		80,88	66,83
2	R 32	129,82	105,31	78,75	162,02		137,39	109,68
3	R 407F	88,24	73,76	57,66	121,81		106,08	88,22
4	R 410A	89,09	72,79	54,90	124,68		106,59	86,26
5	R 448A	82,17	68,77	53,80	114,05		99,50	82,95
6	R 449A	80,73	67,48	52,70	112,41		98,01	81,66
7	R 452A	64,02	53,39	41,46	96,40		84,16	70,27
8	R 452B	104,31	85,37	64,58	135,83		116,16	93,96
9	R 454A	85,98	71,86	56,10	114,63		99,88	83,12
10	R 454B	106,17	86,93	65,81	136,87		117,08	94,74
11	R1270	141,13	115,61	87,30	107,38		92,47	75,55
12	R290	137,48	112,95	85,58	98,51		85,36	70,32
13	R 744	122,56	103,60	73,35	160,12		139,38	105,64
14	R469A	116,49	100,32	81,48	153,25		135,93	115,34

	Kältemittel	s_{VDI} 2. Stufe in J/kgK			q_0 bei variablem Mitteldruck in kJ/kg			
		I	II	III	I		II	III
1	R404A	1671	1674	1678	154,86		164,96	175,47
2	R 32	2145	2172	2201	311,84		324,63	337,97
3	R 407F	1895	1905	1916	210,12		220,06	230,56
4	R 410A	1876	1890	1906	215,05		226,16	237,71
5	R 448A	1884	1892	1901	195,61		205,39	215,72
6	R 449A	1865	1872	1881	193,11		202,91	213,23
7	R 452A	1677	1681	1684	152,77		162,06	171,82
8	R 452B	2021	2039	2058	250,98		262,65	274,84
9	R 454A	1857	1865	1874	202,60		212,79	223,52
10	R 454B	2026	2044	2064	255,30		267,03	279,30
11	R1270	2386	2398	2412	354,72		372,67	391,25
12	R290	2370	2378	2388	348,71		366,85	385,84
13	R 744	1826	1861	1911	241,14		256,03	278,14
14	R469A	2002	2020	2040	292,76		302,8766	313,4836

	Kältemittel	Enthalpiedifferenz durch Flashgas MDF in kJ/kg			Enthalpiedifferenz durch Kühlung des HG ND VDI in kJ/kg			
		I	II	III	I		II	III
1	R404A	79,97	55,97	36,21	90,16		82,53	74,05
2	R 32	99,56	69,45	44,76	167,22		144,14	119,59
3	R 407F	87,43	63,16	42,57	113,37		101,95	89,34
4	R 410A	87,87	60,88	39,07	120,63		106,61	91,48
5	R 448A	86,14	62,16	41,80	106,67		96,58	85,37
6	R 449A	85,41	61,54	41,27	105,28		95,36	84,36
7	R 452A	79,35	56,42	37,27	87,08		80,00	72,06
8	R 452B	93,06	65,19	42,26	136,98		120,35	102,41
9	R 454A	89,32	64,20	42,98	112,00		101,26	89,35
10	R 454B	93,71	65,76	42,70	138,87		121,97	103,74
11	R1270	142,05	98,47	62,52	181,00		162,82	142,63
12	R290	139,63	99,07	64,07	180,76		164,28	145,75
13	R 744	142,84	98,63	62,28	184,16		161,59	127,97
14	R469A	137,33	92,76	63,63	150,84		135,5977	118,2726

					benötigte Enthalpi H in kJ			
	Kältemittel	Gesamte VDA Enthalpie bei p_m in kJ/kg			$dh_{ges,pm}$ + $dh_{HG\ kühl}$			
		I	II	III	I		II	III
1	R404A	164,24	170,68	177,10	254,40		253,21	251,15
2	R 32	311,20	322,57	333,89	478,42		466,71	453,48
3	R 407F	218,67	225,57	232,57	332,05		327,51	321,91
4	R 410A	218,27	227,11	235,89	338,90		333,72	327,37
5	R 448A	205,29	211,76	218,33	311,96		308,35	303,71
6	R 449A	202,75	209,21	215,76	308,03		304,57	300,12
7	R 452A	163,17	168,91	174,68	250,25		248,91	246,73
8	R 452B	254,51	263,86	273,20	391,48		384,21	375,61
9	R 454A	212,27	219,09	225,97	324,27		320,34	315,32
10	R 454B	259,00	268,38	277,76	397,87		390,36	381,50
11	R1270	375,80	386,41	396,86	556,80		549,22	539,49
12	R290	371,35	381,43	391,60	552,11		545,71	537,34
13	R 744	220,61	239,12	264,60	404,77		400,71	392,57
14	R469A	248,65	258,43	268,81	399,49		394,03	387,09
	Kältemittel	spezifischer Gesamtassenstrom HD Kreis (Korrekturfaktor w_{real} HD VDI)			spezifischer Massenstrom durch Flashgas undKühlung HG VDI Stufe 1			
		I	II	III	I		II	III
1	R404A	3,02	2,21	1,78	2,02		1,21	0,78
2	R 32	2,26	1,84	1,57	1,26		0,84	0,57
3	R 407F	2,53	2,02	1,69	1,53		1,02	0,69
4	R 410A	2,60	2,01	1,66	1,60		1,01	0,66
5	R 448A	2,62	2,06	1,72	1,62		1,06	0,72
6	R 449A	2,63	2,06	1,72	1,63		1,06	0,72
7	R 452A	2,99	2,21	1,80	1,99		1,21	0,80
8	R 452B	2,42	1,93	1,63	1,42		0,93	0,63
9	R 454A	2,64	2,07	1,72	1,64		1,07	0,72
10	R 454B	2,41	1,93	1,62	1,41		0,93	0,62
11	R1270	2,38	1,91	1,61	1,38		0,91	0,61
12	R290	2,38	1,93	1,64	1,38		0,93	0,64
13	R 744	5,20	2,85	1,94	4,20		1,85	0,94
14	R469A	3,59	2,38	1,89	2,59		1,38	0,89
					Enthalpie HD VDI Austritt			
	Kältemittel	Ansaugenthalpie HD VDI in kJ/kg			bei Isentroper Verdichtung			
		I	II	III	I		II	III
1	R404A	365,58	361,93	357,84	392,11		384,52	375,39
2	R 32	515,75	514,32	512,31	572,51		560,74	547,08
3	R 407F	416,67	413,62	410,12	455,50		446,57	436,05
4	R 410A	423,28	421,01	418,24	460,97		452,39	442,15
5	R 448A	406,42	403,10	399,34	442,30		433,66	423,46
6	R 449A	404,17	400,84	397,06	439,33		430,77	420,65
7	R 452A	364,42	360,86	356,87	391,43		384,04	375,16
8	R 452B	463,19	460,88	458,03	508,25		498,26	486,48
9	R 454A	418,76	415,38	411,53	456,03		447,12	436,54
10	R 454B	468,39	466,04	463,15	514,38		504,19	492,20
11	R1270	582,53	575,20	567,07	645,11		627,27	606,60
12	R290	577,60	569,54	560,72	638,99		620,65	599,55
13	R 744	428,77	432,38	435,75	474,92		472,33	464,93
14	R469A	434,91	433,99	432,47	484,33		477,1385	467,907

	Kältemittel	w_{real} VDI 2.Stufe in kJ/kg			korrigierte w_{real} VDI Stufe 2 in kJ/kg		
		I	II	III	I	II	III
1	R404A	53,05	45,18	35,10	160,16	99,72	62,57
2	R 32	113,52	92,84	69,55	256,61	171,17	109,08
3	R 407F	77,67	65,90	51,85	196,51	132,90	87,85
4	R 410A	75,37	62,75	47,81	195,89	125,98	79,53
5	R 448A	71,75	61,12	48,23	187,86	125,97	82,98
6	R 449A	70,33	59,88	47,18	184,61	123,49	81,15
7	R 452A	54,03	46,35	36,58	161,30	102,56	65,69
8	R 452B	90,12	74,77	56,91	218,53	144,59	92,56
9	R 454A	74,54	63,47	50,03	196,58	131,27	86,21
10	R 454B	91,97	76,30	58,09	221,38	146,99	94,28
11	R1270	125,16	104,15	79,07	298,14	198,65	127,59
12	R290	122,78	102,22	77,67	292,55	197,56	127,43
13	R 744	92,30	79,89	58,37	480,36	227,86	113,26
14	R469A	98,84	86,30	70,87	354,73	205,24	133,70

	Kältemittel	spez. VDI Arbeit w_{gesamt} in kJ/kg			Verdichtungsendtemperatur HD VDI (Stufe 2) in °C		
		I	II	III	I	II	III
1	R404A	224,31	152,57	102,86	80,85	58,76	35,48
2	R 32	386,43	276,49	187,83	136,89	105,30	70,52
3	R 407F	284,75	206,66	145,51	107,63	83,62	57,44
4	R 410A	284,98	198,77	134,43	105,43	79,19	50,80
5	R 448A	270,03	194,75	136,78	101,11	77,98	52,86
6	R 449A	265,34	190,97	133,85	99,50	76,47	51,50
7	R 452A	225,33	155,95	107,15	85,32	63,66	40,59
8	R 452B	322,84	229,97	157,14	116,41	88,81	58,67
9	R 454A	282,56	203,12	142,30	101,90	78,48	53,07
10	R 454B	327,55	233,92	160,08	117,61	89,89	59,59
11	R1270	439,26	314,26	214,88	95,94	71,79	45,53
12	R290	430,03	310,51	213,01	86,29	64,24	40,12
13	R 744	602,92	331,47	186,61	120,93	98,41	60,64
14	R469A	471,22	305,56	215,18	134,39	110,98	83,71

	Kältemittel	COP Gesamt		
		I	II	III
1	R404A	0,690	1,081	1,706
2	R 32	0,807	1,174	1,799
3	R 407F	0,738	1,065	1,584
4	R 410A	0,755	1,138	1,768
5	R 448A	0,724	1,055	1,577
6	R 449A	0,728	1,062	1,593
7	R 452A	0,678	1,039	1,604
8	R 452B	0,777	1,142	1,749
9	R 454A	0,717	1,048	1,571
10	R 454B	0,779	1,142	1,745
11	R1270	0,808	1,186	1,821
12	R290	0,811	1,181	1,811
13	R 744	0,400	0,772	1,491
14	R469A	0,621	0,991	1,457

Verbesserung der COP Werte durch zwischenkühlung des Heißgases der 1. Verdichtungsstufe auf den Wert t_{cu} , in der MDF wird dadurch der Dampfanteil geringer

	Kältemittel	Enthalpiedifferenz Heißgaskühlung bei vorheriger abkühlung auf t_{cu} in kJ/kg			Korrekturfaktor w_{real} HD VDI mit zwischenkühlung		
		I	II	III	I	II	III
1	R404A	49,72	35,96	23,41	2,54	1,80	1,42
2	R 32	54,86	40,05	26,45	1,73	1,43	1,25
3	R 407F	46,98	33,52	21,19	2,02	1,60	1,34
4	R 410A	50,93	37,11	24,44	2,06	1,59	1,32
5	R 448A	47,11	33,57	21,21	2,12	1,64	1,36
6	R 449A	47,24	33,70	21,33	2,13	1,64	1,36
7	R 452A	45,89	32,83	20,93	2,49	1,79	1,42
8	R 452B	52,42	38,04	24,88	1,90	1,52	1,29
9	R 454A	49,07	34,95	22,07	2,13	1,64	1,36
10	R 454B	52,59	38,13	24,91	1,89	1,51	1,29
11	R1270	82,84	59,59	38,69	1,96	1,55	1,30
12	R290	91,42	65,65	42,56	2,00	1,58	1,33
13	R 744	69,13	48,46	31,89	3,73	2,05	1,47
14	R469A	50,55	34,88	20,63	2,69	1,77	1,41

	Kältemittel	gesamte spez. VDI Arbeit mit Heißgaskühlung in kJ/kg			COP Werte mit Heißgaszwischen-kühlung		
		I	II	III	I	II	III
1	R404A	198,84	134,23	90,25	0,78	1,23	1,94
2	R 32	326,16	238,31	165,43	0,96	1,36	2,04
3	R 407F	245,45	178,89	126,91	0,86	1,23	1,82
4	R 410A	244,69	172,54	118,14	0,88	1,31	2,01
5	R 448A	234,16	169,00	119,25	0,84	1,22	1,81
6	R 449A	230,56	165,97	116,81	0,84	1,22	1,83
7	R 452A	198,78	136,51	93,54	0,77	1,19	1,84
8	R 452B	275,64	198,99	138,04	0,91	1,32	1,99
9	R 454A	244,41	175,96	123,91	0,83	1,21	1,80
10	R 454B	279,55	202,35	140,60	0,91	1,32	1,99
11	R1270	386,70	276,92	190,30	0,92	1,35	2,06
12	R290	382,69	274,80	188,54	0,91	1,33	2,05
13	R 744	466,41	267,14	158,89	0,52	0,96	1,75
14	R469A	382,16	253,10	181,45	0,77	1,20	1,73

Anhang 13

COP Berechnung der Hochtemperaturstufe der Kaskade

Betriebsbedingungen

Verflüssigungstemperatur I	45	°C	318,15	K	
Verflüssigerausgangstemperatur I	43	°C	316,15	K	
Verflüssigungstemperatur II	35	°C	308,15	K	
Verflüssigerausgangstemperatur II	33	°C	306,15	K	
Verflüssigungstemperatur III	25	°C	298,15	K	
Verflüssigerausgangstemperatur III	23	°C	296,15	K	
Unterkühlung	2	K	2	K	Normalzust.
Verdampfungstemperatur	0	°C	273,15	K	
Überhitzung	6	K	6	K	--> Quelle
Verdampferaustrittstemperatur KM	6	°C	279,15	K	
Verdichteransaugtemperatur	8	°C	281,15	K	--> Annahme
VDA Ansaugtemperatur Luft	7	°C	280,15	K	
Druckabfall Saugleitung bis zum VDI	2	k	2	K	--> Annahme
Saugdruck am VDI	-2	°C	271,15	K	--> Quelle+Neuere
Wirkungsgrad Verdichter	55	%	0,55		Annahmen finden

Zwischenwerte

				Variable Hochdrücke I, II und III			
	Kältemittel	TIL Bezeichnung	p_0 in Pa	p_c I		p_c II	p_c III
1	R404A	Refprop.R404A.MIX	600329	2059284		1619535	1254580
2	R 32	Refprop.R32.fld	813100	2794777		2189831	1689619
3	R 407F	Refprop.R407F.MIX	522217	2165116		1698613	1311022
4	R 410A	Refprop.R410A.MIX	798053	2733533		2144850	1657437
5	R 448A	Refprop.R448A.MIX	515770	2115975		1664178	1287641
6	R 449A	Refprop.R449A.MIX	514438	2086739		1640293	1268519
7	R 452A	Refprop.R452A.MIX	562487	2143963		1690105	1311121
8	R 452B	Refprop.R452B.MIX	740104	2611209		2050874	1585907
9	R 454A	Refprop.R454A.MIX	546688	2193443		1731064	1344427
10	R 454B	Refprop.R454B.MIX	729414	2585528		2031062	1570811
11	R1270	VDIWA2006.propene	584720	1851208		1474277	1157055
12	R290	Refprop.PROPANE.FLD	474457	1534312		1217882	952073
13	R 744	Refprop.CO2.FLD	3485141	12000000		8700000	6434244
14	R469A Bestandteile	Prozentanteile	1329910	5491143		4518953	3662007
	Refprop.CO2.FLD	0,35					
	Refprop.R32.fld	0,325					
	Refprop.R125.fld	0,325					

	spezifische Verdampfungsenthalpie q_0 zu I, II und III, Entropie und Enthalpie am VDI Ansaug							
	Kältemittel	q_0 in kJ/kg			t_0 am VDI		$h_{VDI\ 1}$	s_{VDI}
		I	II	III	in Pa		in kJ/kg	in J/kgK
1	R404A	106,68	123,07	138,54	562975		373,09	1708
2	R 32	240,73	261,34	280,79	762262		526,57	2204
3	R 407F	153,15	169,75	185,59	487128		423,75	1937
4	R 410A	156,11	174,33	191,42	748373		432,54	1924
5	R 448A	140,57	156,95	172,59	481603		413,18	1925
6	R 449A	138,76	155,09	170,68	480453		410,97	1905
7	R 452A	104,29	119,85	134,60	526515		370,76	1713
8	R 452B	187,79	206,80	224,76	693873		472,54	2073
9	R 454A	145,30	162,40	178,70	511348		425,78	1900
10	R 454B	191,66	210,76	228,81	683823		477,71	2078
11	R1270	272,30	301,99	329,97	550606		593,45	2450
12	R290	269,48	298,13	325,63	446133		589,93	2437
13	R 744	134,38	149,31	177,03	3304201		447,87	1914
14	R469A	148,26	172,43	193,77	1247576		444,44	2062
	Kältemittel	w_{is} in kJ/kg			w_{real} in kJ/kg			
		I	II	III	I		II	III
1	R404A	27,17	22,23	16,89	49,41		40,41	30,70
2	R 32	56,74	45,20	33,39	103,16		82,19	60,70
3	R 407F	40,38	33,60	26,43	73,42		61,10	48,06
4	R 410A	38,21	30,79	23,01	69,47		55,98	41,84
5	R 448A	37,55	31,34	24,73	68,27		56,99	44,96
6	R 449A	36,73	30,61	24,09	66,78		55,65	43,79
7	R 452A	28,37	23,63	18,50	51,59		42,97	33,65
8	R 452B	45,86	37,06	27,90	83,39		67,39	50,72
9	R 454A	39,30	32,79	25,86	71,46		59,63	47,02
10	R 454B	46,84	37,88	28,55	85,17		68,88	51,91
11	R1270	62,51	50,62	37,98	113,66		92,03	69,05
12	R290	61,08	49,55	37,25	111,06		90,10	67,73
13	R 744	59,87	43,16	28,69	108,85		78,48	52,16
14	R469A	55,44	47,56	39,27	100,79		86,47	71,39

COP Berechnung der Hochtemperaturstufe der Kaskade

Ergebnissezu I, t_c = 45 °C

	Kältemittel	COP_{ideal}	COP_{real}	t_{V2} in °C ideal	t_{V2} in °C real	Druckverhältnis p_c/p_0
1	R404A	3,926	2,159	59,71	77,6	3,66
2	R 32	4,243	2,334	92,69	130,8	3,67
3	R 407F	3,793	2,086	75,92	104,7	4,44
4	R 410A	4,086	2,247	75,41	101,5	3,65
5	R 448A	3,744	2,059	72,11	98,4	4,39
6	R 449A	3,778	2,078	71,08	96,8	4,34
7	R 452A	3,676	2,022	62,85	82,7	4,07
8	R 452B	4,095	2,252	81,54	112,1	3,76
9	R 454A	3,697	2,033	73,16	99,4	4,29
10	R 454B	4,092	2,250	82,19	113,3	3,78
11	R1270	4,356	2,396	64,94	90,6	3,36
12	R290	4,412	2,426	59,35	82,0	3,44
13	R 744	2,245	1,235	112,24	146,2	3,63
14	R469A	2,674	1,471	101,52	138,0	4,40
	Maxwert	R290	2,426			

Ergebnissezu II, t_c = 35 °C

	Kältemittel	COP_{ideal}	COP_{real}	t_{V2} in °C ideal	t_{V2} in °C real	Druckverhältnis p_c/p_0
1	R404A	5,537	3,045	48,82	64,32	2,88
2	R 32	5,782	3,180	75,35	106,69	2,87
3	R 407F	5,051	2,778	63,61	88,54	3,49
4	R 410A	5,662	3,114	61,56	83,44	2,87
5	R 448A	5,008	2,754	60,42	83,39	3,46
6	R 449A	5,067	2,787	59,47	81,84	3,41
7	R 452A	5,071	2,789	52,17	69,67	3,21
8	R 452B	5,579	3,069	66,86	92,53	2,96
9	R 454A	4,952	2,724	61,26	84,17	3,39
10	R 454B	5,563	3,060	67,45	93,56	2,97
11	R1270	5,966	3,281	53,16	75,01	2,68
12	R290	6,016	3,309	48,83	68,19	2,73
13	R 744	3,459	1,903	84,01	108,67	2,63
14	R469A	3,625	1,994	87,78	120,04	3,62
	Maxwert	R290	3,309			

Ergebnissezu III, t_c = 25 °C

	Kältemittel	COP_{ideal}	COP_{real}	t_{V2} in °C ideal	t_{V2} in °C real	Druckverhältnis p_c/p_0
1	R404A	8,204	4,512	38,01	50,47	2,23
2	R 32	8,410	4,626	57,65	81,49	2,22
3	R 407F	7,021	3,862	51,10	71,53	2,69
4	R 410A	8,317	4,575	47,50	64,50	2,21
5	R 448A	6,979	3,839	48,59	67,50	2,67
6	R 449A	7,086	3,897	47,72	66,11	2,64
7	R 452A	7,274	4,001	41,52	55,97	2,49
8	R 452B	8,057	4,431	51,91	71,94	2,29
9	R 454A	6,910	3,800	49,22	68,08	2,63
10	R 454B	8,014	4,408	52,42	72,82	2,30
11	R1270	8,688	4,779	41,28	58,50	2,10
12	R290	8,741	4,808	38,18	53,49	2,13
13	R 744	6,170	3,394	58,76	75,27	1,95
14	R469A	4,935	2,714	73,45	100,92	2,94
	Maxwert	R290	4,808			

Anhang 14

Ermittlung des Mitteldrucks der Kaskade bei Verschiedenen Verflüssigungstemperaturen

Bezugskältemittel Hochtemperaturseite			Refprop.PROPANE.FLD
Verflüssigungstemperatur	45	°C	318,15 K
Verflüssigungsdruck	15,34	bar	1534312 Pa
Verflüssigungstemperatur	35	°C	308,15 K
Verflüssigungsdruck	12,18	bar	1217882 Pa
Verflüssigungstemperatur	25	°C	298,15 K
Verflüssigungsdruck	9,52	bar	952073 Pa
Verdampfungstemp.	-29	°C	244,15 K

Berechnungen und Ergebnisse

Mitteldruckberechnung für t_c 45 °C

	Niedertemperaturkältemittel		p0	Mitteldrücke		T_M		Druckverhältnisse			
				1. Stufe	2.Stufe	K	°C	1.Stufe	2. Stufe	1.Stufe/2.Stufe	
1	R404A	Refprop.R404A.MIX	2,11	6,45	5,01	274,9	1,8	3,06	3,06	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
2	R 32	Refprop.R32.fld	2,85	8,67	5,04	275,2	2,0	3,04	3,04	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
3	R 407F	Refprop.R407F.MIX	1,67	5,82	4,41	270,8	-2,4	3,48	3,48	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
4	R 410A	Refprop.R410A.MIX	2,81	8,53	5,04	275,2	2,0	3,04	3,04	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
5	R 448A	Refprop.R448A.MIX	1,68	5,81	4,45	271,0	-2,1	3,45	3,45	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
6	R 449A	Refprop.R449A.MIX	1,68	5,77	4,48	271,3	-1,8	3,42	3,42	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
7	R 452A	Refprop.R452A.MIX	1,92	6,29	4,68	272,7	-0,5	3,28	3,28	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
8	R 452B	Refprop.R452B.MIX	2,60	8,03	4,96	274,6	1,5	3,09	3,09	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
9	R 454A	Refprop.R454A.MIX	1,84	6,25	4,52	271,6	-1,6	3,39	3,39	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
10	R 454B	Refprop.R454B.MIX	2,56	7,93	4,94	274,5	1,4	3,10	3,10	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
11	R1270	VDIWA2006.propene	2,21	6,46	5,25	276,5	3,4	2,92	2,92	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
12	R290	Refprop.PROPANE.FLD	1,75	5,17	5,17	276,0	2,9	2,96	2,97	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
13	R 744	Refprop.CO2.FLD	14,76	40,34	5,61	278,8	5,6	2,73	2,73	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
14	R469A	Prozentanteile	4,73	17,75	4,09	268,4	-4,8	3,75	3,75	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
	Refprop.CO2.FLD	0,35									
	Refprop.R32.fld	0,325									
	Refprop.R125.fld	0,325									

Berechnungen und Ergebnisse

Mitteldruckberechnung für t_c 35 °C

			Mitteldrücke		T_M		Druckverhältnisse			
			1. Stufe	2.Stufe	K	°C	1.Stufe	2. Stufe	1.Stufe/2.Stufe	
1	R404A		5,74	4,47	271,2	-1,9	2,72	2,72	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
2	R 32		7,70	4,51	271,5	-1,7	2,70	2,70	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
3	R 407F		5,17	3,94	267,2	-5,9	3,09	3,09	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
4	R 410A		7,59	4,51	271,5	-1,7	2,70	2,70	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
5	R 448A		5,16	3,97	267,5	-5,7	3,07	3,07	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
6	R 449A		5,12	4,01	267,7	-5,4	3,04	3,04	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
7	R 452A		5,59	4,18	269,1	-4,1	2,92	2,92	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
8	R 452B		7,14	4,43	270,9	-2,2	2,75	2,75	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
9	R 454A		5,56	4,04	268,0	-5,2	3,02	3,02	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
10	R 454B		7,05	4,42	270,8	-2,3	2,76	2,76	1,001	<--- Was Wäre Wenn Analyse
11	R1270		5,76	4,67	272,7	-0,5	2,61	2,61	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
12	R290		4,61	4,61	272,2	-0,9	2,64	2,64	1,001	<--- Was Wäre Wenn Analyse
13	R 744		36,24	4,96	274,6	1,5	2,45	2,45	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
14	R469A		15,96	3,61	264,5	-8,7	3,38	3,37	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse

Mitteldruckberechnung für t_c 25 °C

			Mitteldrücke		T_M		Druckverhältnisse			
			1. Stufe	2.Stufe	K	°C	1.Stufe	2. Stufe	1.Stufe/2.Stufe	
1	R404A		5,06	3,96	267,4	-5,8	2,40	2,40	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
2	R 32		6,79	4,00	267,7	-5,5	2,38	2,38	1,001	<--- Was Wäre Wenn Analyse
3	R 407F		4,56	3,50	263,6	-9,6	2,72	2,72	1,001	<--- Was Wäre Wenn Analyse
4	R 410A		6,69	3,99	267,6	-5,5	2,38	2,38	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
5	R 448A		4,55	3,52	263,8	-9,4	2,70	2,70	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
6	R 449A		4,52	3,55	264,0	-9,1	2,68	2,68	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
7	R 452A		4,93	3,70	265,3	-7,9	2,57	2,57	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
8	R 452B		6,30	3,93	267,1	-6,1	2,43	2,43	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
9	R 454A		4,90	3,58	264,2	-8,9	2,66	2,66	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
10	R 454B		6,22	3,91	267,0	-6,1	2,43	2,43	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
11	R1270		5,10	4,13	268,7	-4,5	2,31	2,31	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
12	R290		4,08	4,08	268,3	-4,9	2,34	2,34	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
13	R 744		32,32	4,35	270,3	-2,8	2,19	2,19	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
14	R469A		14,25	3,16	260,5	-12,6	3,01	3,01	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse

Ermittlung des Mitteldrucks der Kaskade bei Verschiedenen Verflüssigungstemperaturen

Bezugskältemittel Hochtemperaturseite			Refprop.PROPANE.FLD		
Verflüssigungstemperatur	40	°C	313,15	K	
Verflüssigungsdruck	13,69	bar	1369418	Pa	
Verflüssigungstemperatur	30	°C	303,15	K	
Verflüssigungsdruck	10,79	bar	1078994	Pa	
Verflüssigungstemperatur	20	°C	293,15	K	
Verflüssigungsdruck	8,36	bar	836460	Pa	
Verdampfungstemp.	-29	°C	244,15	K	

Berechnungen und Ergebnisse

Mitteldruckberechnung für t_c 40 °C

	Niedertemperaturkältemittel		p0	Mitteldrücke		T_M		Druckverhältnisse			
				1. Stufe	2.Stufe	K	°C	1.Stufe	2. Stufe	1.Stufe/2.Stufe	
1	R404A	Refprop.R404A.MIX	2,11	6,09	4,74	273,1	-0,1	2,89	2,89	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
2	R 32	Refprop.R32.fld	2,85	8,18	4,77	273,3	0,2	2,87	2,87	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
3	R 407F	Refprop.R407F.MIX	1,67	5,49	4,17	269,0	-4,1	3,28	3,28	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
4	R 410A	Refprop.R410A.MIX	2,81	8,05	4,77	273,3	0,2	2,87	2,87	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
5	R 448A	Refprop.R448A.MIX	1,68	5,48	4,21	269,3	-3,9	3,26	3,26	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
6	R 449A	Refprop.R449A.MIX	1,68	5,44	4,24	269,5	-3,6	3,23	3,23	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
7	R 452A	Refprop.R452A.MIX	1,92	5,93	4,42	270,9	-2,3	3,10	3,09	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
8	R 452B	Refprop.R452B.MIX	2,60	7,58	4,69	272,8	-0,4	2,92	2,92	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
9	R 454A	Refprop.R454A.MIX	1,84	5,90	4,28	269,8	-3,4	3,20	3,20	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
10	R 454B	Refprop.R454B.MIX	2,56	7,49	4,68	272,7	-0,5	2,93	2,93	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
11	R1270	VDIWA2006.propene	2,21	6,10	4,96	274,6	1,5	2,76	2,76	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
12	R290	Refprop.PROPANE.FLD	1,75	4,89	4,89	274,1	1,0	2,80	2,80	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
13	R 744	Refprop.CO2.FLD	14,76	38,26	5,28	276,7	3,6	2,59	2,59	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
14	R469A	Prozentanteile	4,73	16,84	3,84	266,4	-6,7	3,56	3,56	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
	Refprop.CO2.FLD	0,35									
	Refprop.R32.fld	0,325									
	Refprop.R125.fld	0,325									

Berechnungen und Ergebnisse

Mitteldruckberechnung für t_c 30 °C

						Mitteldrücke		T_M		Druckverhältnisse			
						1. Stufe	2.Stufe	K	°C	1.Stufe	2. Stufe	1.Stufe/2.Stufe	
	1	R404A				5,40	4,21	269,3	-3,8	2,56	2,56	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
	2	R 32				7,24	4,25	269,6	-3,6	2,54	2,54	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
	3	R 407F				4,86	3,72	265,4	-7,7	2,90	2,90	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
	4	R 410A				7,13	4,25	269,6	-3,6	2,54	2,54	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
	5	R 448A				4,85	3,74	265,6	-7,5	2,88	2,88	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
	6	R 449A				4,81	3,78	265,9	-7,3	2,86	2,86	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
	7	R 452A				5,26	3,94	267,2	-6,0	2,74	2,74	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
	8	R 452B				6,71	4,17	269,0	-4,1	2,59	2,59	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
	9	R 454A				5,22	3,80	266,1	-7,0	2,84	2,84	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
	10	R 454B				6,63	4,16	268,9	-4,2	2,59	2,59	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
	11	R1270				5,43	4,40	270,7	-2,5	2,45	2,45	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
	12	R290				4,34	4,34	270,3	-2,9	2,49	2,49	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
	13	R 744				34,25	4,65	272,5	-0,7	2,32	2,32	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
	14	R469A				15,09	3,38	262,5	-10,6	3,19	3,19	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse

Mitteldruckberechnung für t_c 20 °C

						Mitteldrücke		T_M		Druckverhältnisse			
						1. Stufe	2.Stufe	K	°C	1.Stufe	2. Stufe	1.Stufe/2.Stufe	
	1	R404A				4,74	3,72	265,4	-7,7	2,25	2,25	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
	2	R 32				6,35	3,75	265,7	-7,5	2,23	2,23	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
	3	R 407F				4,26	3,28	261,7	-11,5	2,55	2,55	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
	4	R 410A				6,26	3,75	265,7	-7,5	2,23	2,23	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
	5	R 448A				4,26	3,31	261,8	-11,3	2,53	2,53	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
	6	R 449A				4,23	3,34	262,1	-11,0	2,51	2,51	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
	7	R 452A				4,62	3,47	263,3	-9,8	2,41	2,41	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
	8	R 452B				5,89	3,68	265,1	-8,0	2,27	2,27	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
	9	R 454A				4,59	3,35	262,3	-10,9	2,49	2,49	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
	10	R 454B				5,82	3,67	265,0	-8,1	2,28	2,28	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
	11	R1270				4,79	3,86	266,6	-6,6	2,16	2,16	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
	12	R290				3,82	3,82	266,3	-6,9	2,19	2,19	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
	13	R 744				30,44	4,06	268,1	-5,0	2,06	2,06	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse
	14	R469A				13,42	2,95	258,5	-14,7	2,84	2,84	1,000	<--- Was Wäre Wenn Analyse

Anhang 15

Berechnungsmodell 3 Kaskadenschaltung 1. Fall

Betriebsbedingungen Niedertemperaturkreislauf

Unterkühlung	2	K	2	K	Normalzust.
Verdampfungstemperatur	-27	°C	246,15	K	
Überhitzung	6	K	6	K	--> Quelle
Verdampferaustrittstemperatur KM	-21	°C	252,15	K	
Verdichteransaugtemperatur	0	°C	273,15	K	--> Annahme
VDA Ansaugtemperatur Luft	-20	°C	253,15	K	
Druckabfall Saugleitung bis zum VDI	2	k	2	K	--> Annahme
Saugdruck am VDI	-29	°C	244,15	K	--> Quelle+Neuere
Wirkungsgrad Verdichter	55	%	0,55		Annahmen finden
Temperaturdifferenz Kaskade	5	K	5	K	

Berechnungen zur Tieftemperaturstufe

	Kältemittel	TIL Bezeichnung	p_0 in Pa	Mitteldruck Temperaturen p_m in °C berechnet in separater Berechnung		
				t_m I	t_m II	t_m III
1	R404A	Refprop.R404A.MIX	228556	1,8	-1,9	-5,8
2	R 32	Refprop.R32.fld	308963	2,0	-1,7	-5,5
3	R 407F	Refprop.R407F.MIX	182936	-2,4	-5,9	-9,6
4	R 410A	Refprop.R410A.MIX	304262	2,0	-1,7	-5,5
5	R 448A	Refprop.R448A.MIX	183646	-2,1	-5,7	-9,4
6	R 449A	Refprop.R449A.MIX	183755	-1,8	-5,4	-9,1
7	R 452A	Refprop.R452A.MIX	208398	-0,5	-4,1	-7,9
8	R 452B	Refprop.R452B.MIX	281467	1,5	-2,2	-6,1
9	R 454A	Refprop.R454A.MIX	200305	-1,6	-5,2	-8,9
10	R 454B	Refprop.R454B.MIX	277249	1,4	-2,3	-6,1
11	R1270	VDIWA2006.propene	238231	3,4	-0,5	-4,5
12	R290	Refprop.PROPANE.FLD	188559	2,9	-0,9	-4,9
13	R 744	Refprop.CO2.FLD	1577047	5,6	1,5	-2,8
14	R469A	Prozentanteile	512054	-4,8	-8,7	-12,6

Refprop.CO2.FLD	0,35
Refprop.R32.fld	0,325
Refprop.R125.fld	0,325

	Kältemitel	t_c der 1. Stufe in K I	II	III	t_{cu} der 1. Stufe in K I	II	III
1	R404A	279,9	276,2	272,4	277,9	274,2	270,4
2	R 32	280,2	276,5	272,7	278,2	274,5	270,7
3	R 407F	275,8	272,2	268,6	273,8	270,2	266,6
4	R 410A	280,2	276,5	272,6	278,2	274,5	270,6
5	R 448A	276,0	272,5	268,8	274,0	270,5	266,8
6	R 449A	276,3	272,7	269,0	274,3	270,7	267,0
7	R 452A	277,7	274,1	270,3	275,7	272,1	268,3
8	R 452B	279,6	275,9	272,1	277,6	273,9	270,1
9	R 454A	276,6	273,0	269,2	274,6	271,0	267,2
10	R 454B	279,5	275,8	272,0	277,5	273,8	270,0
11	R1270	281,5	277,7	273,7	279,5	275,7	271,7
12	R290	281,0	277,2	273,3	279,0	275,2	271,3
13	R 744	283,8	279,6	275,3	281,8	277,6	273,3
14	R469A	273,4	269,5	265,5	271,4	267,5	263,5

		Mitteldruck in Pa							
		(Verflüssigungstemp. 1. Stufe)							
	Kältemitel	I	II	II					
1	R404A	751987,8969	671711,6866	595584,8					
2	R 32	1011820,766	903104,5238	800243,15					
3	R 407F	684201,0348	610533,6685	540943,66					
4	R 410A	995578,6534	888840,4549	787599,06					
5	R 448A	681293,6245	608284,9123	538919,57					
6	R 449A	676138,9628	603672,0749	534742,47					
7	R 452A	734666,5534	656317,8519	581797,52					
8	R 452B	937206,3857	836823,0791	741535,08					
9	R 454A	730311,7137	652536,7688	578774,01					
10	R 454B	925822,0989	826864,9684	732583,34					
11	R1270	744817,6372	667369,2493	593532,83					
12	R290	599091,6187	536306,174	476283,99					
13	R 744	4572871,799	4121991,048	3690590,7					
14	R469A	2027372,713	1830489,352	1641388,5					
	Kältemittel	q_0 in kJ/kg			t_0 am VDI		$h_{VDI\ 1}$	$s_{VDI\ 1}$	
		I	II	III	in Pa		in kJ/kg	in J/kgK	
1	R404A	149,62	154,83	160,15	210733		373,31	1786	
2	R 32	304,61	311,12	317,77	284909		533,80	2374	
3	R 407F	204,79	209,92	215,16	167443		424,44	2041	
4	R 410A	208,91	214,59	220,41	280622		436,69	2041	
5	R 448A	190,21	195,29	200,51	168338		413,32	2020	
6	R 449A	187,80	192,87	198,09	168488		411,11	1999	
7	R 452A	147,69	152,54	157,52	191719		370,26	1786	
8	R 452B	244,44	250,43	256,57	259566		476,95	2207	
9	R 454A	196,56	201,91	207,39	184100		426,34	2000	
10	R 454B	248,71	254,73	260,92	255665		482,07	2214	
11	R1270	344,09	353,72	363,54	221039		590,86	2609	
12	R290	338,34	347,94	357,83	174536		586,85	2592	
13	R 744	222,35	233,05	243,68	1476314		467,68	2112	
14	R469A	231,18	237,97	244,90	472794		450,53	2208	
	Kältemittel	w_{is} 1. Stufe in kJ/kg			w_{real} 1. Stufe in kJ/kg				
		I	II	III	I		II	III	
1	R404A	29,40	26,71	23,85	53,45		48,56	43,37	
2	R 32	59,17	53,31	47,21	107,58		96,94	85,83	
3	R 407F	40,58	37,08	33,41	73,78		67,43	60,74	
4	R 410A	40,65	36,77	32,67	73,91		66,85	59,41	
5	R 448A	37,96	34,71	31,26	69,01		63,10	56,84	
6	R 449A	37,25	34,04	30,64	67,72		61,89	55,71	
7	R 452A	29,61	27,04	24,30	53,84		49,16	44,18	
8	R 452B	47,82	43,27	38,48	86,94		78,67	69,97	
9	R 454A	39,98	36,53	32,88	72,69		66,41	59,79	
10	R 454B	48,71	44,09	39,21	88,56		80,16	71,30	
11	R1270	66,87	60,53	53,81	121,58		110,05	97,83	
12	R290	64,71	58,64	52,18	117,66		106,62	94,88	
13	R 744	59,00	52,97	46,70	107,27		96,31	84,91	
14	R469A	59,25	54,67	49,86	107,73		99,41	90,65	

	Kältemittel	COP ideal			COP real		
		I	II	III	I	II	III
1	R404A	5,089	5,797	6,714	2,799	3,188	3,693
2	R 32	5,148	5,836	6,732	2,831	3,210	3,702
3	R 407F	5,047	5,661	6,440	2,776	3,113	3,542
4	R 410A	5,139	5,837	6,746	2,827	3,210	3,710
5	R 448A	5,011	5,627	6,413	2,756	3,095	3,527
6	R 449A	5,042	5,666	6,465	2,773	3,116	3,556
7	R 452A	4,988	5,642	6,483	2,743	3,103	3,566
8	R 452B	5,112	5,788	6,667	2,811	3,183	3,667
9	R 454A	4,917	5,528	6,307	2,704	3,040	3,469
10	R 454B	5,106	5,778	6,654	2,808	3,178	3,660
11	R1270	5,146	5,844	6,756	2,830	3,214	3,716
12	R290	5,228	5,933	6,857	2,876	3,263	3,771
13	R 744	3,769	4,399	5,218	2,073	2,420	2,870
14	R469A	3,902	4,353	4,912	2,146	2,394	2,702

	Kältemittel	Heißgastemperatur ideal			Heißgastemperatur real		
		I	II	III	I	II	III
1	R404A	41,75	37,77	33,59	65,8	59,93	53,68
2	R 32	77,11	69,70	61,91	124,1	112,66	100,59
3	R 407F	55,91	51,08	46,02	90,5	83,07	75,23
4	R 410A	58,14	52,57	46,71	92,2	83,79	74,87
5	R 448A	52,11	47,59	42,83	84,1	77,19	69,86
6	R 449A	51,25	46,78	42,07	82,6	75,79	68,54
7	R 452A	43,26	39,35	35,24	68,9	63,06	56,84
8	R 452B	64,02	57,98	51,62	102,3	93,09	83,33
9	R 454A	53,13	48,48	43,60	85,2	78,20	70,73
10	R 454B	64,58	58,52	52,11	103,3	94,04	84,19
11	R1270	50,08	45,29	40,24	80,9	73,67	65,91
12	R290	44,98	40,74	36,25	72,6	66,16	59,26
13	R 744	84,11	75,60	66,72	128,0	115,38	102,17
14	R469A	81,90	75,61	68,99	129,28	119,88	109,91

	Kältemittel	tatsächliches Druckverhältnis am Verdichter			optim. Druckverh. nach p_m Berechnung Werte aus separater Rechnung		
		I	II	III	I	II	III
1	R404A	3,57	3,19	2,83	3,06	2,72	2,40
2	R 32	3,55	3,17	2,81	3,04	2,70	2,38
3	R 407F	4,09	3,65	3,23	3,48	3,09	2,72
4	R 410A	3,55	3,17	2,81	3,04	2,70	2,38
5	R 448A	4,05	3,61	3,20	3,45	3,07	2,70
6	R 449A	4,01	3,58	3,17	3,42	3,04	2,68
7	R 452A	3,83	3,42	3,03	3,28	2,92	2,57
8	R 452B	3,61	3,22	2,86	3,09	2,75	2,43
9	R 454A	3,97	3,54	3,14	3,39	3,02	2,66
10	R 454B	3,62	3,23	2,87	3,10	2,76	2,43
11	R1270	3,37	3,02	2,69	2,92	2,61	2,31
12	R290	3,43	3,07	2,73	2,96	2,64	2,34
13	R 744	3,10	2,79	2,50	2,73	2,45	2,19
14	R469A	4,29	3,87	3,47	3,75	3,38	3,01

Berechnungen zur Hochtemperaturstufe

Betriebsbedingungen Hochtemperaturkreislauf

Kältemittel 2. Stufe		R290		Refprop.PROPANE.FLD			
Verflüssigungstemperatur I		45	°C	318,15	K		
Verflüssigerausgangstemperatur I		43	°C	316,15	K		
Verflüssigungstemperatur II		35	°C	308,15	K		
Verflüssigerausgangstemperatur II		33	°C	306,15	K		
Verflüssigungstemperatur III		25	°C	298,15	K		
Verflüssigerausgangstemperatur III		23	°C	296,15	K		
Unterkühlung		2	K	2	K		
Sauggasüberhitzung Stufe 2		4	K	4	K		
Gesamtüberhitzung mit IWÜ		20	K	20	K		
Wirkungsgrad Verdichter		55	%	0,55			

	Werte der 2. Stufe bei Anwendung von Kältemittel der 1.Stufe	Verflüssigungsdruck p_c in Pa I	II	III	Verdampfungstemperatur der 2. Stufe t_m in K I	II	III
1	R404A	1534312	1217882	952073	274,9	271,2	267,4
2	R 32	1534312	1217882	952073	275,2	271,5	267,7
3	R 407F	1534312	1217882	952073	270,8	267,2	263,6
4	R 410A	1534312	1217882	952073	275,2	271,5	267,6
5	R 448A	1534312	1217882	952073	271,0	267,5	263,8
6	R 449A	1534312	1217882	952073	271,3	267,7	264,0
7	R 452A	1534312	1217882	952073	272,7	269,1	265,3
8	R 452B	1534312	1217882	952073	274,6	270,9	267,1
9	R 454A	1534312	1217882	952073	271,6	268,0	264,2
10	R 454B	1534312	1217882	952073	274,5	270,8	267,0
11	R1270	1534312	1217882	952073	276,5	272,7	268,7
12	R290	1534312	1217882	952073	276,0	272,2	268,3
13	R 744	1534312	1217882	952073	278,8	274,6	270,3
14	R469A	1534312	1217882	952073	268,4	264,5	260,5

	Werte der 2. Stufe bei Anwendung von Kältemittel der 1.Stufe	Verdampfungsdruckder 2. Stufe in Pa I	II	III	spez.Verdampfungsenthalpie q_0 in kJ/kg I	II	III
1	R404A	500889	447192	396265	296,35	320,30	342,90
2	R 32	504256	450570	399668	296,64	320,61	343,25
3	R 407F	441068	394257	349950	291,09	315,20	338,00
4	R 410A	504381	450546	399415	296,65	320,61	343,22
5	R 448A	444566	397228	352213	291,41	315,50	338,25
6	R 449A	448318	400649	355257	291,75	315,85	338,58
7	R 452A	467821	417778	370202	293,51	317,53	340,20
8	R 452B	495823	442881	392570	295,93	319,91	342,53
9	R 454A	452137	403589	357583	292,10	316,14	338,84
10	R 454B	494409	441711	391451	295,81	319,80	342,42
11	R1270	525135	467354	412556	298,35	322,12	344,52
12	R290	517437	461213	407663	297,72	321,57	344,04
13	R 744	561381	496270	434894	301,19	324,62	346,66
14	R469A	408660	360941	316090	287,99	311,71	334,07

Berechnung IWÜ

	Werte der 2. Stufe bei Anwendung von Kältemittel der 1.Stufe	Enthalpiedifferenz IWÜ kJ/kg I	II	III
1	R404A	28,34	27,86	27,38
2	R 32	28,37	27,89	27,41
3	R 407F	27,80	27,36	26,93
4	R 410A	28,37	27,89	27,41
5	R 448A	27,83	27,39	26,95
6	R 449A	27,87	27,42	26,98
7	R 452A	28,04	27,59	27,13
8	R 452B	28,29	27,82	27,35
9	R 454A	27,90	27,45	27,00
10	R 454B	28,28	27,81	27,34
11	R1270	28,55	28,04	27,54
12	R290	28,48	27,99	27,49
13	R 744	28,85	28,30	27,75
14	R469A	27,50	27,04	26,57

	Werte der 2. Stufe bei Anwendung von Kältemittel der 1.Stufe	spezifische Entropie am Verdichteransaug in J/kgK I	II	III	reale spezifische Verdichterarbeit unkorrigiert in kJ/kg I	II	III
1	R404A	2494,6	2498,1	2502,2	105,76216	94,37852	82,13033
2	R 32	2494,4	2497,9	2501,9	105,12803	93,67081	81,33235
3	R 407F	2498,6	2502,4	2506,8	117,79865	106,2211	93,72087
4	R 410A	2494,4	2497,9	2501,9	105,10462	93,67588	81,39136
5	R 448A	2498,3	2502,1	2506,5	117,051	105,5155	93,12002
6	R 449A	2498,1	2501,8	2506,2	116,25568	104,7097	92,31787
7	R 452A	2496,7	2500,4	2504,7	112,22593	100,775	88,47621
8	R 452B	2494,9	2498,4	2502,5	106,72413	95,28935	83,00422
9	R 454A	2497,8	2501,6	2506,0	115,45288	104,0225	91,7095
10	R 454B	2495,0	2498,5	2502,6	106,99445	95,53801	83,27072
11	R1270	2493,2	2496,7	2500,8	101,28816	90,2314	78,37042
12	R290	2493,7	2497,1	2501,2	102,68596	91,4754	79,48397
13	R 744	2491,4	2494,9	2499,0	94,970835	84,58437	73,44743
14	R469A	2501,1	2505,6	2510,8	125,02039	114,5159	103,2016

	Werte der 2. Stufe bei Anwendung von Kältemittel der 1.Stufe	reale Heißgastemperatur 2. Stufe in °C I	II	III	COP 2. Stufe unkorrigiert I	II	III
1	R404A	76,82	65,32	53,33	2,802	3,394	4,175
2	R 32	76,65	65,11	53,09	2,822	3,423	4,220
3	R 407F	80,15	68,77	56,90	2,471	2,967	3,606
4	R 410A	76,64	65,11	53,10	2,822	3,423	4,217
5	R 448A	79,94	68,57	56,72	2,490	2,990	3,632
6	R 449A	79,72	68,33	56,47	2,510	3,016	3,668
7	R 452A	78,60	67,18	55,28	2,615	3,151	3,845
8	R 452B	77,09	65,58	53,60	2,773	3,357	4,127
9	R 454A	79,50	68,13	56,28	2,530	3,039	3,695
10	R 454B	77,16	65,65	53,68	2,765	3,347	4,112
11	R1270	75,59	64,12	52,18	2,946	3,570	4,396
12	R290	75,98	64,48	52,52	2,899	3,515	4,328
13	R 744	73,87	62,49	50,68	3,171	3,838	4,720
14	R469A	82,17	71,22	59,85	2,304	2,722	3,237

	Werte der 2. Stufe bei Anwendung von Kältemittel der 1.Stufe	spez. Verflüssigungsenthalpie q_c 1. Stufe			Verhältnis der Enthalpien q_c Stufe 1 / q_0 Stufe 2		
		I	II	III	I	II	III
1	R404A	221,56	221,86	222,00	0,75	0,69	0,65
2	R 32	432,56	428,42	423,97	1,46	1,34	1,24
3	R 407F	296,30	295,07	293,62	1,02	0,94	0,87
4	R 410A	301,70	300,32	298,70	1,02	0,94	0,87
5	R 448A	277,11	276,28	275,24	0,95	0,88	0,81
6	R 449A	273,41	272,65	271,68	0,94	0,86	0,80
7	R 452A	218,90	219,08	219,08	0,75	0,69	0,64
8	R 452B	350,98	348,70	346,14	1,19	1,09	1,01
9	R 454A	287,97	287,04	285,89	0,99	0,91	0,84
10	R 454B	356,96	354,58	351,91	1,21	1,11	1,03
11	R1270	496,64	494,73	492,34	1,66	1,54	1,43
12	R290	489,68	488,25	486,39	1,64	1,52	1,41
13	R 744	353,38	353,12	352,35	1,17	1,09	1,02
14	R469A	358,14	356,61	354,77	1,24	1,14	1,06

	Werte der 2. Stufe bei Anwendung von Kältemittel der 1.Stufe	Korrigirte spezifische VDI Arbeit der 2. Stufe in kJ/kg			gesamte spezifische VDI Arbeit beider Stufen		
		I	II	III	I	II	III
1	R404A	79,07	65,37	53,17	132,52	113,93	96,54
2	R 32	153,30	125,17	100,46	260,88	222,10	186,29
3	R 407F	119,91	99,43	81,42	193,69	166,86	142,16
4	R 410A	106,89	87,75	70,83	180,80	154,59	130,24
5	R 448A	111,31	92,40	75,77	180,32	155,50	132,62
6	R 449A	108,94	90,39	74,08	176,66	152,28	129,79
7	R 452A	83,70	69,53	56,98	137,54	118,68	101,16
8	R 452B	126,58	103,87	83,88	213,52	182,54	153,85
9	R 454A	113,82	94,45	77,38	186,50	160,86	137,16
10	R 454B	129,11	105,93	85,58	217,67	186,09	156,88
11	R1270	168,61	138,58	111,99	290,19	248,63	209,83
12	R290	168,89	138,89	112,37	286,56	245,51	207,25
13	R 744	111,43	92,01	74,65	218,69	188,32	159,56
14	R469A	155,47	131,01	109,60	263,21	230,42	200,25

Berechnung des COP Wertes der Gesamten Kaskade

	Werte der 2. Stufe bei Anwendung von Kältemittel der 1.Stufe	COP Wert der gesamten Kaskade I	II	III
1	R404A	1,129	1,359	1,659
2	R 32	1,168	1,401	1,706
3	R 407F	1,057	1,258	1,514
4	R 410A	1,155	1,388	1,692
5	R 448A	1,055	1,256	1,512
6	R 449A	1,063	1,267	1,526
7	R 452A	1,074	1,285	1,557
8	R 452B	1,145	1,372	1,668
9	R 454A	1,054	1,255	1,512
10	R 454B	1,143	1,369	1,663
11	R1270	1,186	1,423	1,733
12	R290	1,181	1,417	1,727
13	R 744	1,017	1,237	1,527
14	R469A	0,878	1,033	1,223

Vergleichswerte aus Seperater Berechnung bei welcher die Hochtemperaturstufe das das ungünstigere Druckverhältnis nutzt --> 2. Fall

	Werte der 2. Stufe bei Anwendung von Kältemittel der 1.Stufe	COP Wert der gesamten Kaskade I	II	III
1	R404A	1,128	1,359	1,660
2	R 32	1,165	1,401	1,710
3	R 407F	1,048	1,250	1,506
4	R 410A	1,153	1,388	1,695
5	R 448A	1,047	1,248	1,505
6	R 449A	1,055	1,259	1,519
7	R 452A	1,070	1,282	1,554
8	R 452B	1,141	1,370	1,669
9	R 454A	1,047	1,249	1,507
10	R 454B	1,138	1,367	1,664
11	R1270	1,180	1,418	1,728
12	R290	1,174	1,411	1,721
13	R 744	1,047	1,274	1,571
14	R469A	0,875	1,030	1,220

Berechnung der COP Werte der Gesamtkaskade mit zwischenkühlung des HG der 1. Stufe auf t_{cu}

	Werte der 2. Stufe bei Anwendung von Kältemittel der 1.Stufe	Verflüssigungsenthalpie 1.Stufe nach Kühlung auf tcu in kJ/kg I	II	III	Verhältnis der Enthalpien q_c Stufe 1 / q_0 Stufe 2 I	II	III
1	R404A	198,75	195,33	192,24	0,6706361	0,609836	0,560629
2	R 32	348,88	347,28	345,98	1,1761278	1,083172	1,007968
3	R 407F	250,81	247,74	244,96	0,8616463	0,785979	0,724749
4	R 410A	253,55	251,22	249,19	0,8547275	0,783571	0,726044
5	R 448A	237,28	234,02	231,08	0,8142632	0,741737	0,683177
6	R 449A	234,98	231,69	228,73	0,8053895	0,733543	0,675564
7	R 452A	194,43	191,07	188,03	0,6624398	0,601744	0,552714
8	R 452B	290,33	288,03	286,05	0,9810903	0,900341	0,835105
9	R 454A	245,02	241,72	238,74	0,8388225	0,764601	0,704584
10	R 454B	294,87	292,54	290,56	0,9968361	0,914749	0,848565
11	R1270	429,76	424,50	419,86	1,4404724	1,317844	1,218662
12	R290	433,02	426,05	419,86	1,4544434	1,324886	1,220372
13	R 744	255,39	258,61	262,02	0,8479264	0,796652	0,755842
14	R469A	269,07	267,87	266,99	0,9343048	0,859365	0,799209

	Werte der 2. Stufe bei Anwendung von Kältemittel der 1.Stufe	gesamte spezifische VDI Arbeit beider Stufen mit zwischenkühlung I	II	III	COP Wert der gesamten Kaskade mit Zwischenkühlung I	II	III
1	R404A	124,38	106,12	89,41	1,203	1,459	1,791
2	R 32	231,22	198,40	167,81	1,317	1,568	1,894
3	R 407F	175,28	150,91	128,66	1,168	1,391	1,672
4	R 410A	163,74	140,25	118,50	1,276	1,530	1,860
5	R 448A	164,33	141,37	120,46	1,158	1,381	1,665
6	R 449A	161,35	138,70	118,08	1,164	1,391	1,678
7	R 452A	128,18	109,80	93,08	1,152	1,389	1,692
8	R 452B	191,65	164,46	139,29	1,275	1,523	1,842
9	R 454A	169,53	145,95	124,40	1,159	1,383	1,667
10	R 454B	195,21	167,55	141,96	1,274	1,520	1,838
11	R1270	267,48	228,96	193,34	1,286	1,545	1,880
12	R290	267,01	227,82	191,88	1,267	1,527	1,865
13	R 744	187,79	163,70	140,42	1,184	1,424	1,735
14	R469A	224,54	197,82	173,13	1,030	1,203	1,415

Vergleichswerte aus Seperater Berechnung bei welcher die Hochtemperaturstufe das das ungünstigere Druckverhältnis nutzt --> 2. Fall

	Werte der 2. Stufe bei Anwendung von Kältemittel der 1.Stufe	COP Wert der gesamten Kaskade I	II	III
1	R404A	1,179	1,435	1,768
2	R 32	1,296	1,550	1,880
3	R 407F	1,140	1,363	1,644
4	R 410A	1,252	1,508	1,841
5	R 448A	1,130	1,353	1,637
6	R 449A	1,136	1,362	1,649
7	R 452A	1,127	1,364	1,667
8	R 452B	1,252	1,501	1,823
9	R 454A	1,133	1,357	1,642
10	R 454B	1,250	1,498	1,819
11	R1270	1,261	1,520	1,857
12	R290	1,240	1,500	1,838
13	R 744	1,202	1,448	1,770
14	R469A	1,012	1,187	1,400

	Entwicklung der COP Werte bei variablen tmeperaturdifferenzen an der Kaskade								
		COP Werte bei dt = 5 K			COP Werte bei dt = 2 K				
		I	II	III	I		II	III	
1	R404A	1,203	1,459	1,791	1,258		1,535	1,899	
2	R 32	1,317	1,568	1,894	1,377		1,650	2,010	
3	R 407F	1,168	1,391	1,672	1,215		1,455	1,761	
4	R 410A	1,276	1,530	1,860	1,333		1,609	1,973	
5	R 448A	1,158	1,381	1,665	1,204		1,445	1,754	
6	R 449A	1,164	1,391	1,678	1,211		1,455	1,768	
7	R 452A	1,152	1,389	1,692	1,202		1,457	1,788	
8	R 452B	1,275	1,523	1,842	1,331		1,600	1,952	
9	R 454A	1,159	1,383	1,667	1,207		1,448	1,757	
10	R 454B	1,274	1,520	1,838	1,330		1,597	1,947	
11	R1270	1,286	1,545	1,880	1,344		1,624	1,994	
12	R290	1,267	1,527	1,865	1,323		1,605	1,976	
13	R 744	1,184	1,424	1,735	1,253		1,515	1,861	
14	R469A	1,030	1,203	1,415	1,069		1,254	1,482	
		Veränderung im Vgl zu 5 K							
		I	II	III					
1	R404A	104,6	105,2	106,0					
2	R 32	104,5	105,2	106,1					
3	R 407F	104,0	104,6	105,3					
4	R 410A	104,5	105,2	106,1					
5	R 448A	104,0	104,6	105,4					
6	R 449A	104,1	104,6	105,4					
7	R 452A	104,3	104,9	105,7					
8	R 452B	104,4	105,1	106,0					
9	R 454A	104,1	104,7	105,4					
10	R 454B	104,4	105,1	105,9					
11	R1270	104,5	105,1	106,0					
12	R290	104,4	105,1	106,0					
13	R 744	105,9	106,4	107,2					
14	R469A	103,8	104,2	104,8					

Öle für Kältemittel R290 (Propan)

Anhang 16

Charakterisierung der Öle

Öl	Öltyp	Anwendungen	Kennzeichnung auf Verdichter
SHC226E	Polyalphaolefinöl (PAO)	Standard-Ölfüllung	"P" (z.B. 4VESP-10P)
BSG68K	Polyalkylenglykolöl (PAG)	Option für kompakte Kältemittelkreisläufe	"Z"

Öl *BITZER Öle f* | **Öltyp** *ür R290* | **Anwendungen** | **Kennzeichnung auf Verdichter**

Sicherheitsdatenblätter

Über dieses Dokument hinaus ist das Sicherheitsdatenblatt (material safety data sheet, MSDS) zum jeweiligen Öl zu beachten. Es enthält Angaben zur Giftigkeit, Handhabung, persönlicher Schutzausrüstung und Entsorgung des Öls. Sicherheitsdatenblätter für alle BITZER Öle sind auf Anfrage erhältlich.

Anwendungsbereiche

GEFAHR

Explosionsgefahr und damit Lebensgefahr bei Kältemittelaustritt und vorhandener Zündquelle!

Aufgrund der besonders hohen Löslichkeit von R290 in herkömmlichen Ölen werden die BITZER Verdichter mit speziellen Ölen befüllt, die einen hohen Viskositätsindex und besonders gute tribologische Eigenschaften aufweisen.

Mit Blick auf die Löslichkeit ergeben sich besondere Anforderungen an die Ausführung, Betriebsweise und Steuerung von Verdichter und Anlage. Ungenügende Überhitzung im Betrieb und ungenügende Beheizung des Ölsumpfs bei Stillstand führen zu starker Minderung der Ölviskosität im Verdichter. Folgen sind Leistungsminderung, starker Verschleiß an Triebwerksteilen, erhöhter Ölwurf und Schaumbildung. Verdichter gegen "Nassbetrieb" absichern und ausreichend hohe
Sauggastemperatur gewährleisten − die Sauggasüberhitzung muss bei Hubkolbenverdichtern mindestens 20 K betragen!

- Niedrige Öltemperaturen und hohen saugseitigen Stillstandsdruck verhindern, Ölheizung ist zwingend erforderlich, ggf. zusätzlich Abpumpschaltung vorsehen.
- Schnelle Änderungen des Saugdrucks vermeiden − Gefahr von Mischreibung durch starke Ausgasung des Kältemittels aus dem Öl und instabile Sauggasüberhitzung.
- Schnelle Änderungen des Verflüssigungsdrucks vermeiden − Gefahr starker Schaumbildung im Ölabscheider!

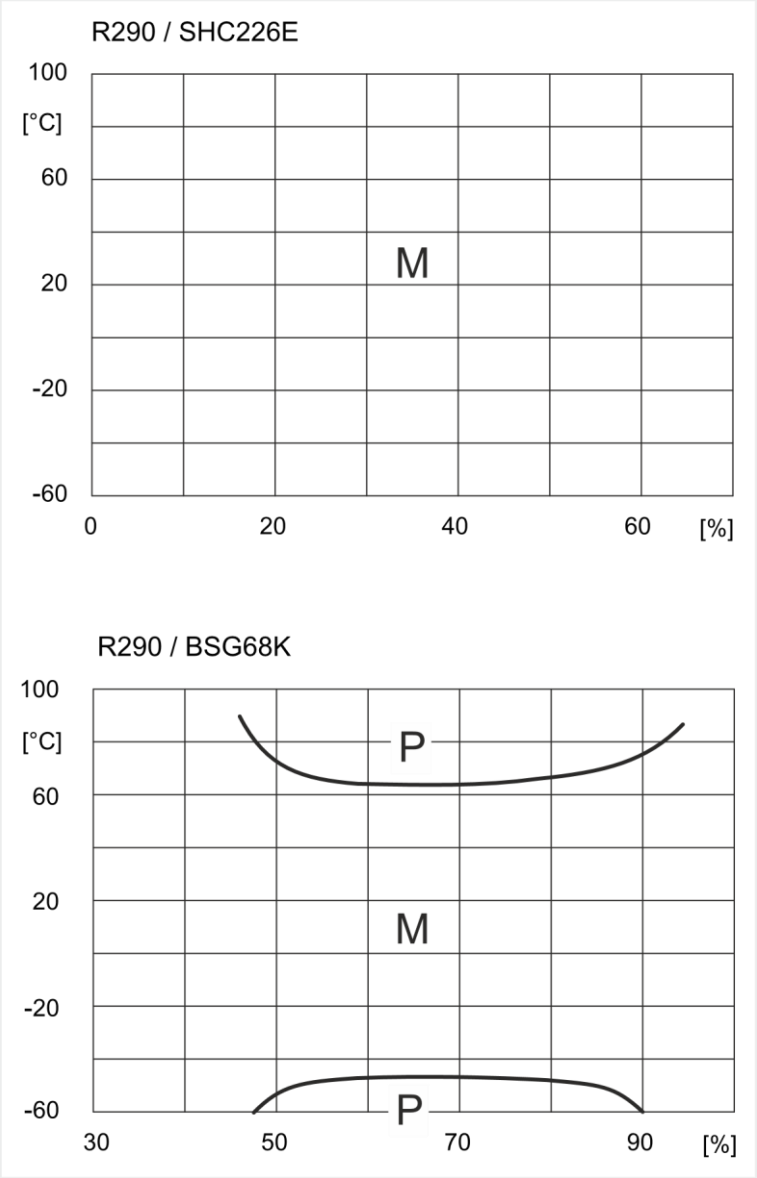
Weiteres zum Einsatz von R290 in halbhermetischen Verdichtern: Technische Information AT-660

Technische Daten

	BSG68K	SHC226E	Einheit
Dichte bei 15°C	1,003	0,830	g/ml
Flammpunkt	> 200	250	°C
Stockpunkt	-46	-45	°C
Kinematische Viskosität			
bei 40°C	68	67	cSt
bei 100°C	16	10	cSt

Technische Daten der Öle für R290 in BITZER Hubkolbenverdichtern

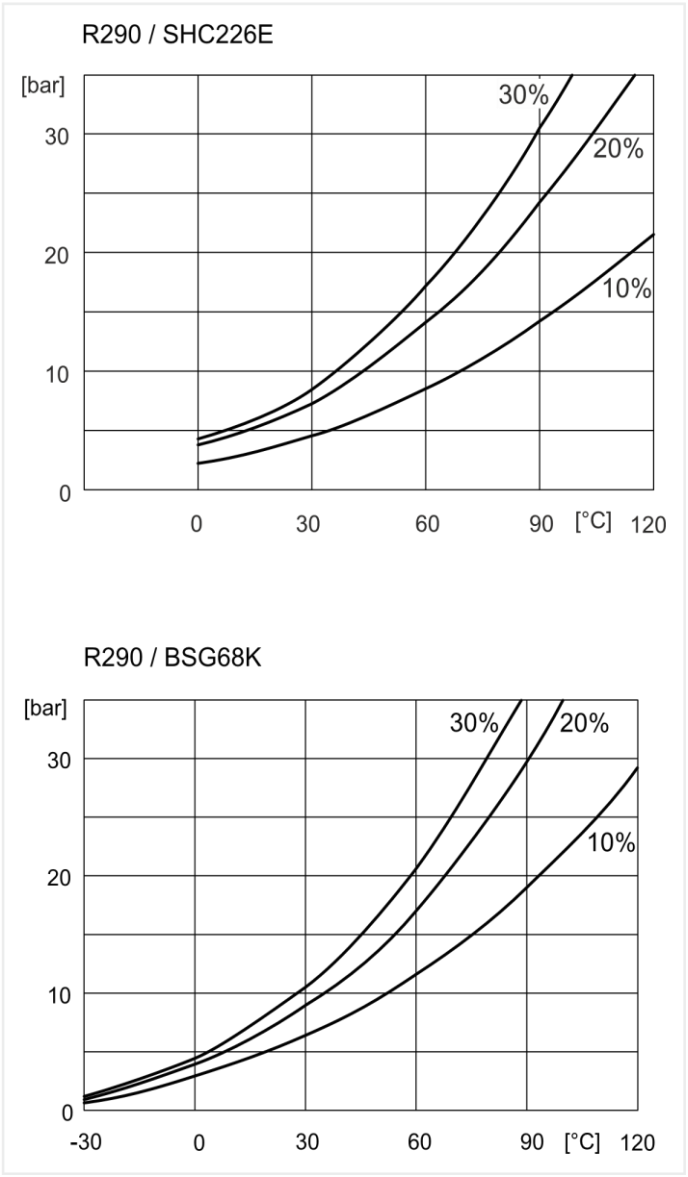
Mischungsgrenzen



Mischungsgrenzen für R290: Grenztemperaturen in Abhängigkeit vom Ölanteil (Masseanteil Öl in % im Öl-Kältemittelgemisch).
M: Bereich der vollständigen Mischbarkeit.
P: Bereich der Phasentrennung (Mischungslücke).

Löslichkeit des Kältemittels im Öl

Die folgenden Diagramme können verwendet werden, um den Kältemittelanteil im Öl in Abhängigkeit von Kältemitteldruck und Öltemperatur abzulesen.



Öle für R290: Kältemitteldruck in Abhängigkeit von Öltemperatur und Kältemittelanteil (Masseanteil Kältemittel in % im ÖlKältemittelgemisch)

Warnwerte für Gebrauchtöle

Die hier aufgeführten Öle SHC226E (PAO) und B S G 6 8 K (PAG) werden nach DIN51503 Teil 1 in die Gruppe KE eingestuft. Für die Beurteilung des Öls im Gebrauchtzustand – z.B. im Hinblick auf Wassergehalt oder Neutralisationszahl – gelten die Richtwerte der DIN51503 Teil 2.

Öl	**Kinematische Viskosität bei 40°C (DIN EN ISO3104)**	**Max. Wassergehalt (DIN51777-2)**	**Neutralisationszahl (DIN51558-1)**
SHC226E	außerhalb von 57 .. 76 cSt (*)	80 mg H_2O/ kg Öl	0,1 mg KOH/ g
BSG68K	außerhalb von 58 .. 78 cSt (*)	800 mg H_2O/ kg Öl	0,2 mg KOH/ g

Warnwerte für gebrauchte BITZER Öle für R290.

(*): das ist ± 15% vom Wert des frischen Öls

Bei Wartungsarbeiten unbedingt beachten:

HINWEIS

Gefahr von Funkenbildung durch unbeabsichtigte Schaltvorgänge oder Überhitzung der Ölheizung bei Ölwechsel.

HINWEIS

Gefahr von Funkenbildung, bei Entladung elektrostatischer Aufladung!

HINWEIS

Brandgefahr!

R290 oder R1270 lösen sich sehr gut im Kältemaschinenöl. Gebrauchtöl aus solchen Anlagen kann auch bei Atmosphärendruck noch relativ hohe Anteile an gelöstem R290 oder R1270 enthalten. Diese Anteile gasen aus. Bei Lagerung und Transport beachten:

> Gebrauchtöl in druckfeste Behälter einfüllen.

> Behälter mit Stickstoff als Schutzgas befüllen und verschließen.

> Behälter kennzeichnen, z. B. mit dem Warnzeichen "feuergefährlicher Stoff" W022 aus ISO7010.

Elastomerverträglichkeit

In der Literatur empfohlene Dichtungsmaterialien für Polyalkylenglykolöle (PAG) und Polyalphaolefinöle (PAO) mit R290:

- Chlor-Butadien-Kautschuk (CR), z.B. Neoprene
- Acrylnitril-Butadien-Kautschuk (NBR), Nitrilgehalt >36%
- hydrierter Acrylnitril-Butadien-Kautschuk (HNBR), Nitrilgehalt >36%
- Fluor-Kautschuk (FKM)

KT-500-9 // 06.2021

Anhang 17

Berechnungsmodell 3 Kaskadenschaltung 2. Fall

Betriebsbedingungen Niedertemperaturkreislauf

Unterkühlung	2	K	2	K	Normalzust.	
Verdampfungstemperatur	-27	°C	246,15	K		
Überhitzung	6	K	6	K	--> Quelle	
Verdampferaustrittstemperatur KM	-21	°C	252,15	K		
Verdichteransaugtemperatur	0	°C	273,15	K	--> Annahme	
VDA Ansaugtemperatur Luft	-20	°C	253,15	K		
Druckabfall Saugleitung bis zum VDI	2	k	2	K	--> Annahme	
Saugdruck am VDI	-29	°C	244,15	K	--> Quelle+Neuere	
Wirkungsgrad Verdichter	55	%	0,55		Annahmen finden	
Temperaturdifferenz Kaskade	5	K	5	K		

Berechnungen zur Tieftemperaturstufe

	Kältemittel	TIL Bezeichnung	p_0 in Pa	Mitteldruck Temperaturen p_m in °C berechnet in separater Berechnung		
				t_m I	t_m II	t_m III
1	R404A	Refprop.R404A.MIX	228556	1,8	-1,9	-5,8
2	R 32	Refprop.R32.fld	308963	2,0	-1,7	-5,5
3	R 407F	Refprop.R407F.MIX	182936	-2,4	-5,9	-9,6
4	R 410A	Refprop.R410A.MIX	304262	2,0	-1,7	-5,5
5	R 448A	Refprop.R448A.MIX	183646	-2,1	-5,7	-9,4
6	R 449A	Refprop.R449A.MIX	183755	-1,8	-5,4	-9,1
7	R 452A	Refprop.R452A.MIX	208398	-0,5	-4,1	-7,9
8	R 452B	Refprop.R452B.MIX	281467	1,5	-2,2	-6,1
9	R 454A	Refprop.R454A.MIX	200305	-1,6	-5,2	-8,9
10	R 454B	Refprop.R454B.MIX	277249	1,4	-2,3	-6,1
11	R1270	VDIWA2006.propene	238231	3,4	-0,5	-4,5
12	R290	Refprop.PROPANE.FLD	188559	2,9	-0,9	-4,9
13	R 744	Refprop.CO2.FLD	1577047	5,6	1,5	-2,8
14	R469A	Prozentanteile	512054	-4,8	-8,7	-12,6

Refprop.CO2.FLD	0,35
Refprop.R32.fld	0,325
Refprop.R125.fld	0,325

	Kältemitel	Mitteldruck Verflüssigung tc der 1. Stufe in K I	II	III	t_{cu} der 1. Stufe in K I	II	III
1	R404A	274,9	271,2	267,4	272,9	269,2	265,4
2	R 32	275,2	271,5	267,7	273,2	269,5	265,7
3	R 407F	270,8	267,2	263,6	268,8	265,2	261,6
4	R 410A	275,2	271,5	267,6	273,2	269,5	265,6
5	R 448A	271,0	267,5	263,8	269,0	265,5	261,8
6	R 449A	271,3	267,7	264,0	269,3	265,7	262,0
7	R 452A	272,7	269,1	265,3	270,7	267,1	263,3
8	R 452B	274,6	270,9	267,1	272,6	268,9	265,1
9	R 454A	271,6	268,0	264,2	269,6	266,0	262,2
10	R 454B	274,5	270,8	267,0	272,5	268,8	265,0
11	R1270	276,5	272,7	268,7	274,5	270,7	266,7
12	R290	276,0	272,2	268,3	274,0	270,2	266,3
13	R 744	278,8	274,6	270,3	276,8	272,6	268,3
14	R469A	268,4	264,5	260,5	266,4	262,5	258,5

		Mitteldruck in Pa							
		(Verflüssigungstemp. 1. Stufe)							
	Kältemitel	I	II	II					
1	R404A	645398,9381	573943,164	506432,46					
2	R 32	866752,2178	770217,0197	679221,43					
3	R 407F	582386,9066	517264,595	455995,94					
4	R 410A	853498,1102	758619,3828	668962,69					
5	R 448A	580888,8315	516233,7113	455054,04					
6	R 449A	576539,8187	512363,6727	451566,91					
7	R 452A	628679,6073	559046,6773	493078,97					
8	R 452B	803082,4029	713876,9119	629520,58					
9	R 454A	624634,7868	555557,7599	490304,95					
10	R 454B	793277,1845	705340,6439	621877,53					
11	R1270	645686,6385	576168,3057	510124,17					
12	R290	517436,655	461213,1466	407663,19					
13	R 744	4033801,359	3623704,6	3232063,4					
14	R469A	1774691,304	1595769,372	1424513,8					
	Kältemittel	q_0 in kJ/kg			t_0 am VDI		$h_{VDI\ 1}$	$s_{VDI\ 1}$	
		I	II	III	in Pa		in kJ/kg	in J/kgK	
1	R404A	156,62	161,74	166,99	210733		373,31	1786	
2	R 32	313,41	319,82	326,39	284909		533,80	2374	
3	R 407F	211,98	217,04	222,22	167443		424,44	2041	
4	R 410A	216,57	222,16	227,89	280622		436,69	2041	
5	R 448A	197,30	202,32	207,48	168338		413,32	2020	
6	R 449A	194,88	199,88	205,03	168488		411,11	1999	
7	R 452A	154,34	159,13	164,04	191719		370,26	1786	
8	R 452B	252,55	258,45	264,51	259566		476,95	2207	
9	R 454A	203,93	209,21	214,61	184100		426,34	2000	
10	R 454B	256,88	262,81	268,91	255665		482,07	2214	
11	R1270	356,53	365,95	375,57	221039		590,86	2609	
12	R290	350,97	360,43	370,17	174536		586,85	2592	
13	R 744	235,18	245,37	255,57	1476314		467,68	2112	
14	R469A	239,97	246,64	253,45	472794		450,53	2208	
	Kältemittel	w_{is} 1. Stufe in kJ/kg			w_{real} 1. Stufe in kJ/kg				
		I	II	III	I		II	III	
1	R404A	25,76	22,98	20,03	46,83		41,78	36,42	
2	R 32	51,22	45,30	39,12	93,14		82,36	71,12	
3	R 407F	35,65	32,06	28,29	64,81		58,29	51,43	
4	R 410A	35,39	31,42	27,24	64,34		57,12	49,52	
5	R 448A	33,39	30,05	26,51	60,71		54,63	48,20	
6	R 449A	32,75	29,45	25,96	59,54		53,55	47,19	
7	R 452A	26,06	23,40	20,57	47,38		42,54	37,39	
8	R 452B	41,63	36,99	32,11	75,69		67,26	58,39	
9	R 454A	35,19	31,65	27,90	63,99		57,54	50,73	
10	R 454B	42,41	37,70	32,73	77,11		68,55	59,52	
11	R1270	58,63	52,12	45,23	106,59		94,76	82,23	
12	R290	56,69	50,44	43,80	103,07		91,72	79,64	
13	R 744	51,73	45,68	39,36	94,06		83,05	71,57	
14	R469A	53,30	48,62	43,70	96,91		88,41	79,46	

	Kältemittel	COP ideal			COP real		
		I	II	III	I	II	III
1	R404A	6,080	7,039	8,337	3,344	3,871	4,585
2	R 32	6,118	7,060	8,344	3,365	3,883	4,589
3	R 407F	5,947	6,771	7,856	3,271	3,724	4,321
4	R 410A	6,120	7,072	8,368	3,366	3,889	4,602
5	R 448A	5,909	6,733	7,826	3,250	3,703	4,304
6	R 449A	5,951	6,787	7,899	3,273	3,733	4,345
7	R 452A	5,923	6,802	7,976	3,258	3,741	4,387
8	R 452B	6,066	6,987	8,237	3,336	3,843	4,530
9	R 454A	5,794	6,611	7,692	3,187	3,636	4,231
10	R 454B	6,057	6,971	8,215	3,331	3,834	4,518
11	R1270	6,081	7,022	8,304	3,345	3,862	4,567
12	R290	6,191	7,145	8,451	3,405	3,930	4,648
13	R 744	4,546	5,372	6,493	2,500	2,955	3,571
14	R469A	4,502	5,072	5,799	2,476	2,790	3,190

	Kältemittel	Heißgastemperatur ideal			Heißgastemperatur real		
		I	II	III	I	II	III
1	R404A	36,37	32,32	28,08	57,9	51,76	45,27
2	R 32	67,04	59,47	51,54	108,6	96,77	84,28
3	R 407F	49,10	44,16	38,98	80,0	72,34	64,20
4	R 410A	50,59	44,92	38,95	80,8	72,11	62,88
5	R 448A	45,77	41,15	36,29	74,4	67,26	59,64
6	R 449A	44,99	40,42	35,60	73,0	65,99	58,45
7	R 452A	37,87	33,89	29,70	60,8	54,78	48,33
8	R 452B	55,80	49,65	43,16	89,8	80,27	70,16
9	R 454A	46,69	41,95	36,96	75,5	68,18	60,43
10	R 454B	56,31	50,13	43,59	90,7	81,12	70,92
11	R1270	43,86	38,98	33,82	71,5	63,94	55,87
12	R290	39,38	35,04	30,44	64,1	57,39	50,20
13	R 744	73,85	65,27	56,31	112,8	100,01	86,57
14	R469A	73,72	67,29	60,53	117,05	107,34	97,03

	Kältemittel	tatsächliches Druckverhältnis am Verdichter			optim. Druckverh. nach p_m Berechnung Werte aus separater Rechnung		
		I	II	III	I	II	III
1	R404A	3,06	2,72	2,40	3,06	2,72	2,40
2	R 32	3,04	2,70	2,38	3,04	2,70	2,38
3	R 407F	3,48	3,09	2,72	3,48	3,09	2,72
4	R 410A	3,04	2,70	2,38	3,04	2,70	2,38
5	R 448A	3,45	3,07	2,70	3,45	3,07	2,70
6	R 449A	3,42	3,04	2,68	3,42	3,04	2,68
7	R 452A	3,28	2,92	2,57	3,28	2,92	2,57
8	R 452B	3,09	2,75	2,43	3,09	2,75	2,43
9	R 454A	3,39	3,02	2,66	3,39	3,02	2,66
10	R 454B	3,10	2,76	2,43	3,10	2,76	2,43
11	R1270	2,92	2,61	2,31	2,92	2,61	2,31
12	R290	2,96	2,64	2,34	2,96	2,64	2,34
13	R 744	2,73	2,45	2,19	2,73	2,45	2,19
14	R469A	3,75	3,38	3,01	3,75	3,38	3,01

Berechnungen zur Hochtemperaturstufe

Betriebsbedingungen Hochtemperaturkreislauf

	Kältemittel 2. Stufe		R290		Refprop.PROPANE.FLD			
	Verflüssigungstemperatur I		45	°C	318,15	K		
	Verflüssigerausgangstemperatur I		43	°C	316,15	K		
	Verflüssigungstemperatur II		35	°C	308,15	K		
	Verflüssigerausgangstemperatur II		33	°C	306,15	K		
	Verflüssigungstemperatur III		25	°C	298,15	K		
	Verflüssigerausgangstemperatur III		23	°C	296,15	K		
	Unterkühlung		2	K	2	K		
	Sauggasüberhitzung Stufe 2		4	K	4	K		
	Gesamtüberhitzung mit IWÜ		20	K	20	K		
	Wirkungsgrad Verdichter		55	%	0,55			

	Werte der 2. Stufe bei Anwendung von Kältemittel der 1.Stufe	Verflüssigungsdruck p_c in Pa I	II	III	Mitteldruck Verdampfungstemperatur der 2. Stufe t_m in K I	II	III
1	R404A	1534312	1217882	952073	269,9	266,2	262,4
2	R 32	1534312	1217882	952073	270,2	266,5	262,7
3	R 407F	1534312	1217882	952073	265,8	262,2	258,6
4	R 410A	1534312	1217882	952073	270,2	266,5	262,6
5	R 448A	1534312	1217882	952073	266,0	262,5	258,8
6	R 449A	1534312	1217882	952073	266,3	262,7	259,0
7	R 452A	1534312	1217882	952073	267,7	264,1	260,3
8	R 452B	1534312	1217882	952073	269,6	265,9	262,1
9	R 454A	1534312	1217882	952073	266,6	263,0	259,2
10	R 454B	1534312	1217882	952073	269,5	265,8	262,0
11	R1270	1534312	1217882	952073	271,5	267,7	263,7
12	R290	1534312	1217882	952073	271,0	267,2	263,3
13	R 744	1534312	1217882	952073	273,8	269,6	265,3
14	R469A	1534312	1217882	952073	263,4	259,5	255,5

	Werte der 2. Stufe bei Anwendung von Kältemittel der 1.Stufe	Verdampfungsdruckder 2. Stufe in Pa I	II	III	spez.Verdampfungsenthalpie q_0 in kJ/kg I	II	III
1	R404A	429590	381787	336630	290,01	313,92	336,49
2	R 32	432593	384789	339641	290,30	314,24	336,83
3	R 407F	376347	334853	295737	284,70	308,79	331,55
4	R 410A	432704	384768	339418	290,31	314,23	336,81
5	R 448A	379454	337482	297731	285,03	309,09	331,80
6	R 449A	382788	340509	300413	285,38	309,44	332,14
7	R 452A	400130	355682	313596	287,14	311,13	333,77
8	R 452B	425073	377957	333361	289,58	313,53	336,11
9	R 454A	386182	343112	302464	285,73	309,73	332,40
10	R 454B	423812	376918	332371	289,46	313,42	336,00
11	R1270	451231	399715	351055	292,02	315,75	338,12
12	R290	444356	394251	346720	291,39	315,20	337,63
13	R 744	483643	425471	370865	294,89	318,27	340,27
14	R469A	347603	305425	265962	281,59	305,27	327,61

Berechnung IWÜ

	Werte der 2. Stufe bei Anwendung von Kältemittel der 1.Stufe	Enthalpiedifferenz IWÜ kJ/kg I	II	III
1	R404A	27,70	27,24	26,79
2	R 32	27,72	27,27	26,82
3	R 407F	27,19	26,77	26,36
4	R 410A	27,73	27,27	26,82
5	R 448A	27,22	26,80	26,38
6	R 449A	27,25	26,83	26,41
7	R 452A	27,42	26,98	26,55
8	R 452B	27,65	27,20	26,76
9	R 454A	27,28	26,86	26,43
10	R 454B	27,64	27,19	26,75
11	R1270	27,89	27,42	26,94
12	R290	27,83	27,36	26,89
13	R 744	28,19	27,66	27,13
14	R469A	26,90	26,46	26,02

	Werte der 2. Stufe bei Anwendung von Kältemittel der 1.Stufe	spezifische Entropie am Verdichteransaug in J/kgK I	II	III	reale spezifische Verdichterarbeit unkorrigiert in kJ/kg I	II	III
1	R404A	2499,5	2503,5	2508,3	120,29389	109,241	97,33723
2	R 32	2499,2	2503,3	2507,9	119,63456	108,5051	96,50726
3	R 407F	2504,1	2508,5	2513,5	132,81525	121,5624	109,3988
4	R 410A	2499,2	2503,3	2507,9	119,61022	108,5103	96,56864
5	R 448A	2503,8	2508,2	2513,2	132,03713	120,828	108,7732
6	R 449A	2503,4	2507,8	2512,9	131,20944	119,9893	107,9381
7	R 452A	2501,9	2506,2	2511,1	127,01652	115,8947	103,9395
8	R 452B	2499,8	2503,9	2508,6	121,29417	110,1882	98,24621
9	R 454A	2503,1	2507,5	2512,6	130,37402	119,2741	107,3048
10	R 454B	2499,9	2504,0	2508,8	121,57526	110,4468	98,52342
11	R1270	2497,8	2501,9	2506,7	115,64275	104,929	93,42712
12	R290	2498,3	2502,4	2507,1	117,09572	106,2223	94,58503
13	R 744	2495,7	2499,8	2504,6	109,07803	99,05985	88,30933
14	R469A	2507,0	2512,2	2518,1	140,33392	130,2002	119,2741

	Werte der 2. Stufe bei Anwendung von Kältemittel der 1.Stufe	reale Heißgastemperatur 2. Stufe in °C I	II	III	COP 2. Stufe unkorrigiert I	II	III
1	R404A	80,84	69,66	58,02	2,411	2,874	3,457
2	R 32	80,66	69,45	57,77	2,427	2,896	3,490
3	R 407F	84,36	73,31	61,79	2,144	2,540	3,031
4	R 410A	80,65	69,45	57,78	2,427	2,896	3,488
5	R 448A	84,14	73,09	61,59	2,159	2,558	3,050
6	R 449A	83,91	72,84	61,33	2,175	2,579	3,077
7	R 452A	82,73	71,63	60,08	2,261	2,685	3,211
8	R 452B	81,12	69,94	58,31	2,387	2,845	3,421
9	R 454A	83,67	72,63	61,13	2,192	2,597	3,098
10	R 454B	81,20	70,02	58,39	2,381	2,838	3,410
11	R1270	79,55	68,40	56,81	2,525	3,009	3,619
12	R290	79,95	68,77	57,17	2,488	2,967	3,570
13	R 744	77,73	66,68	55,23	2,703	3,213	3,853
14	R469A	86,50	75,90	64,90	2,007	2,345	2,747

	Werte der 2. Stufe bei Anwendung von Kältemittel der 1.Stufe	spez. Verflüssigungsenthalpie q_c 1. Stufe			Verhältnis der Enthalpien q_c Stufe 1 / q_0 Stufe 2		
		I	II	III	I	II	III
1	R404A	221,93	222,00	221,88	0,77	0,71	0,66
2	R 32	426,91	422,55	417,88	1,47	1,34	1,24
3	R 407F	294,52	293,06	291,38	1,03	0,95	0,88
4	R 410A	299,79	298,16	296,29	1,03	0,95	0,88
5	R 448A	275,90	274,84	273,56	0,97	0,89	0,82
6	R 449A	272,30	271,31	270,11	0,95	0,88	0,81
7	R 452A	219,10	219,05	218,82	0,76	0,70	0,66
8	R 452B	347,84	345,31	342,50	1,20	1,10	1,02
9	R 454A	286,64	285,46	284,05	1,00	0,92	0,85
10	R 454B	353,68	351,05	348,12	1,22	1,12	1,04
11	R1270	494,09	491,68	488,77	1,69	1,56	1,45
12	R290	487,72	485,83	483,50	1,67	1,54	1,43
13	R 744	353,01	352,18	350,91	1,20	1,11	1,03
14	R469A	356,11	354,27	352,14	1,26	1,16	1,07

	Werte der 2. Stufe bei Anwendung von Kältemittel der 1.Stufe	Korrigirte spezifische VDI Arbeit der 2. Stufe in kJ/kg			gesamte spezifische VDI Arbeit beider Stufen		
		I	II	III	I	II	III
1	R404A	92,05	77,25	64,19	138,89	119,03	100,60
2	R 32	175,94	145,91	119,73	269,07	228,27	190,85
3	R 407F	137,39	115,37	96,14	202,20	173,65	147,57
4	R 410A	123,52	102,96	84,95	187,86	160,08	134,47
5	R 448A	127,81	107,44	89,68	188,52	162,07	137,88
6	R 449A	125,20	105,20	87,78	184,74	158,75	134,97
7	R 452A	96,92	81,59	68,14	144,29	124,13	105,54
8	R 452B	145,70	121,36	100,11	221,39	188,62	158,50
9	R 454A	130,79	109,93	91,70	194,78	167,47	142,43
10	R 454B	148,55	123,71	102,08	225,66	192,26	161,59
11	R1270	195,66	163,39	135,05	302,26	258,15	217,29
12	R290	195,99	163,72	135,45	299,06	255,44	215,09
13	R 744	130,58	109,61	91,07	224,64	192,66	162,64
14	R469A	177,47	151,10	128,20	274,38	239,50	207,67

	Berechnung des COP Wertes der Gesamten Kaskade								
	Werte der 2. Stufe bei Anwendung von Kältemittel der 1.Stufe	COP Wert der gesamten Kaskade I	II	III					
1	R404A	1,128	1,359	1,660					
2	R 32	1,165	1,401	1,710					
3	R 407F	1,048	1,250	1,506					
4	R 410A	1,153	1,388	1,695					
5	R 448A	1,047	1,248	1,505					
6	R 449A	1,055	1,259	1,519					
7	R 452A	1,070	1,282	1,554					
8	R 452B	1,141	1,370	1,669					
9	R 454A	1,047	1,249	1,507					
10	R 454B	1,138	1,367	1,664					
11	R1270	1,180	1,418	1,728					
12	R290	1,174	1,411	1,721					
13	R 744	1,047	1,274	1,571					
14	R469A	0,875	1,030	1,220					
	Berechnung der COP Werte der Gesamtkaskade mit zwischenkühlung des HG der 1. Stufe auf t_{cu}								
	Werte der 2. Stufe bei Anwendung von Kältemittel der 1.Stufe	Verflüssigungsenthalpie 1.Stufe nach Kühlung auf tcu in kJ/kg I	II	III	Verhältnis der Enthalpien q_c Stufe 1 / q_0 Stufe 2 I		II	III	
1	R404A	207,34	203,85	200,69	0,7149217		0,649363	0,596414	
2	R 32	360,74	359,08	357,74	1,2426543		1,142708	1,062051	
3	R 407F	259,66	256,55	253,72	0,9120331		0,830811	0,765261	
4	R 410A	263,54	261,15	259,07	0,9078068		0,831081	0,769201	
5	R 448A	245,96	242,65	239,66	0,8629418		0,78504	0,722293	
6	R 449A	243,63	240,29	237,28	0,8537053		0,77653	0,714399	
7	R 452A	202,52	199,09	195,99	0,7052832		0,6399	0,587193	
8	R 452B	300,96	298,59	296,56	1,0392828		0,952368	0,882315	
9	R 454A	254,18	250,82	247,77	0,8895878		0,809786	0,745412	
10	R 454B	305,57	303,17	301,14	1,0556347		0,967304	0,896243	
11	R1270	444,66	439,11	434,16	1,5227138		1,390683	1,284055	
12	R290	448,01	440,87	434,49	1,5374952		1,398677	1,286879	
13	R 744	274,70	277,50	280,56	0,9315495		0,871902	0,824505	
14	R469A	281,23	279,97	279,04	0,9987283		0,91712	0,851758	
	Werte der 2. Stufe bei Anwendung von Kältemittel der 1.Stufe	gesamte spezifische VDI Arbeit beider Stufen mit zwischenkühlung I	II	III	COP Wert der gesamten Kaskade mit Zwischenkühlung I		II	III	
1	R404A	132,83	112,72	94,47	1,179		1,435	1,768	
2	R 32	241,80	206,35	173,62	1,296		1,550	1,880	
3	R 407F	185,94	159,28	135,15	1,140		1,363	1,644	
4	R 410A	172,92	147,30	123,80	1,252		1,508	1,841	
5	R 448A	174,65	149,49	126,77	1,130		1,353	1,637	
6	R 449A	171,55	146,72	124,30	1,136		1,362	1,649	
7	R 452A	136,96	116,70	98,43	1,127		1,364	1,667	
8	R 452B	201,75	172,20	145,07	1,252		1,501	1,823	
9	R 454A	179,97	154,13	130,72	1,133		1,357	1,642	
10	R 454B	205,45	175,38	147,82	1,250		1,498	1,819	
11	R1270	282,69	240,68	202,20	1,261		1,520	1,857	
12	R290	283,10	240,29	201,36	1,240		1,500	1,838	
13	R 744	195,67	169,42	144,38	1,202		1,448	1,770	
14	R469A	237,06	207,81	181,05	1,012		1,187	1,400	

Anhang 18

TGA FACHPLANER
MAGAZIN FÜR TECHNISCHE GEBÄUDEAUSRÜSTUNG
von Gentner

Niedrig-GWP-Kältemittel

Leckageraten von Kältemitteln: Sind Klimaanlagen Klimakiller?

28.06.2021 13:00

Es vergeht kein Sommer, ohne dass die Presse die Technologie Klimaanlage als Klimakiller darstellt. Sind die Leckageraten der Kältemittel so hoch, wie zitiert?

Bild 1 Klimaanlagen weisen deutlich niedrigere Leckageraten auf, als allgemein behauptet wird. Moderne Geräte verfügen über integrierte Sicherheitsfunktionen, die Leckagen bestmöglich verhindern und den Kältemittelverlust begrenzen.

© Daikin

Fakt ist: **Kältemittel** mit einem hohen GWP schaden dem Klima, wenn sie in die **Atmosphäre** gelangen. Zu hinterfragen ist jedoch, ob Kältemittel wirklich in diesem hohen Maße austreten, wie gerne zitiert wird („bis zu 5 %/a bei Split-Klima“). Die Zahlen des Verbands Deutscher Kälte-Klima-Fachbetriebe (VDKF) zu den **Leckageraten** zeigen ein anderes Bild.

Die Analyse anonymisierter **Nutzerdaten** der VDKF LEC-Software[1)] von rund 45 000 Anlagenbetreibern mit insgesamt rund 200 000 Kälte- und Klimaanlagen hat Folgendes ergeben: Mit einem Anteil von 38 % (75 817 Anlagen) stellen die R410A-Anlagen die mit Abstand größte Anzahl aller Systeme, gefolgt von R134a-, R407C- und R404A-Anlagen.

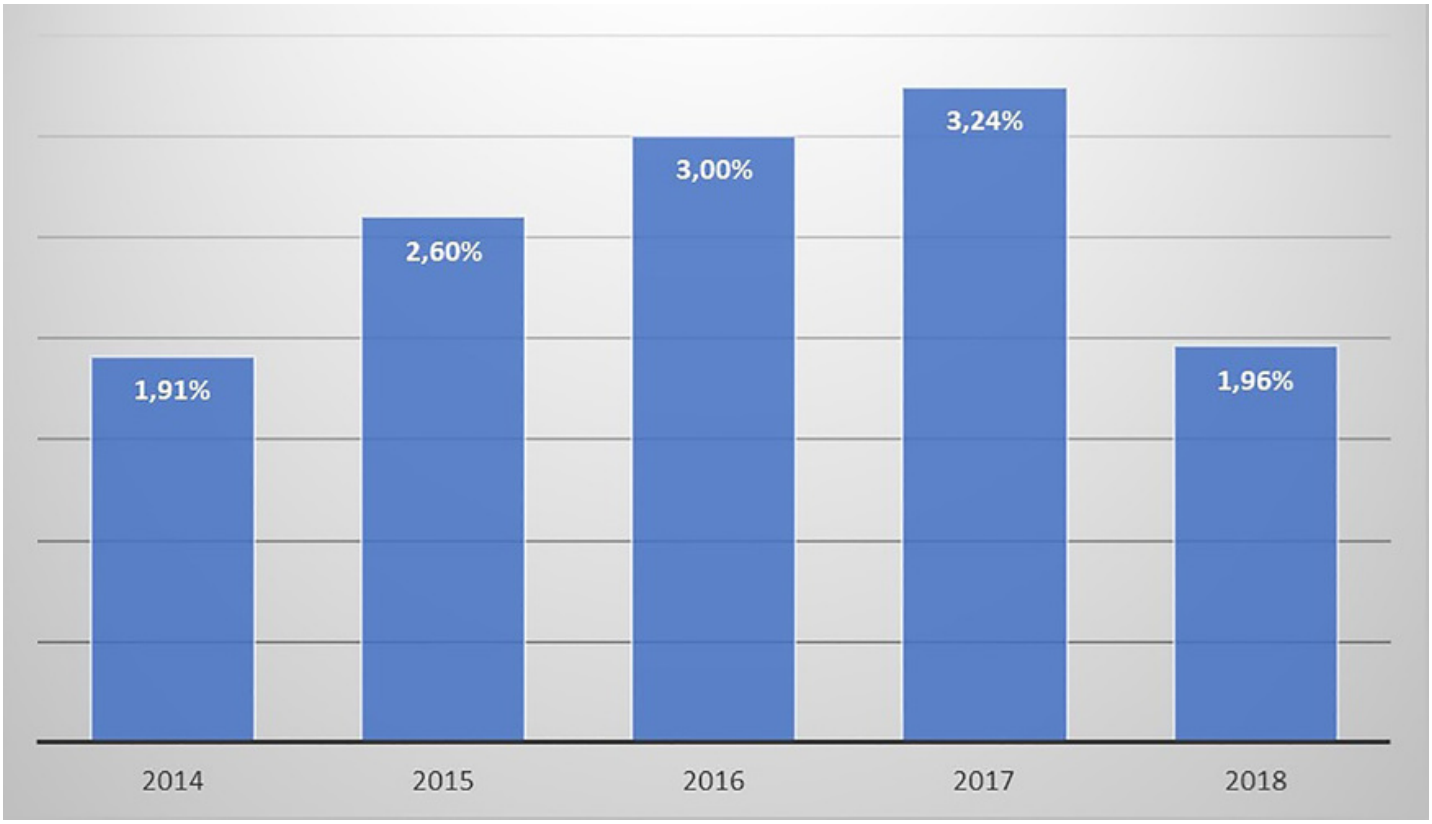
1) .....
Seit der Markteinführung der VDKF LEC-Software im Jahr 2005 nutzen in Deutschland über 1000 Fachunternehmen das LEC-Programm, um die gesetzlich geforderten Aufzeichnungspflichten für Kälte- und Klimaanlagen für Betreiber und Fachbetrieb zu erfüllen. Im Artikel geht es besonders um die aus den LEC-Daten erhobenen nachgefüllten Kältemittel, die eine Aussage über die Kältemittelemissionen in Deutschland aus den bei der Analyse berücksichtigten 199 688 Kälteanlagen von 45 400 Betreibern ermöglichen. In diesen bewerteten Kälteanlagen befinden sich insgesamt rund 2520 t Kältemittel (vgl. Branchenbuch der Kälte- und Klimatechnik 2020 S. 465 ff.).
.....

Reißerische Berichterstattung

Bevorzugt im Sommer berichtet die Tages- und Wirtschaftspresse immer wieder reißerisch und in der Regel technisch wenig fundiert über Klimaanlagen. Mit solcher Berichterstattung gerät eine ganze Branche in Verruf, die für viele **Bereiche unseres täglichen Lebens**, wie die Lebensmittelkühlung, die Krankenhaus- und Laborklimatisierung, überlebenswichtig ist. Betroffen ist aber auch das **Geschäft mit Klimaanlagen** im privaten und gewerblichen Bereich, für deren Einsatz es schließlich auch gute Gründe gibt. Hierzu zwei Beispiele aus den Medien:

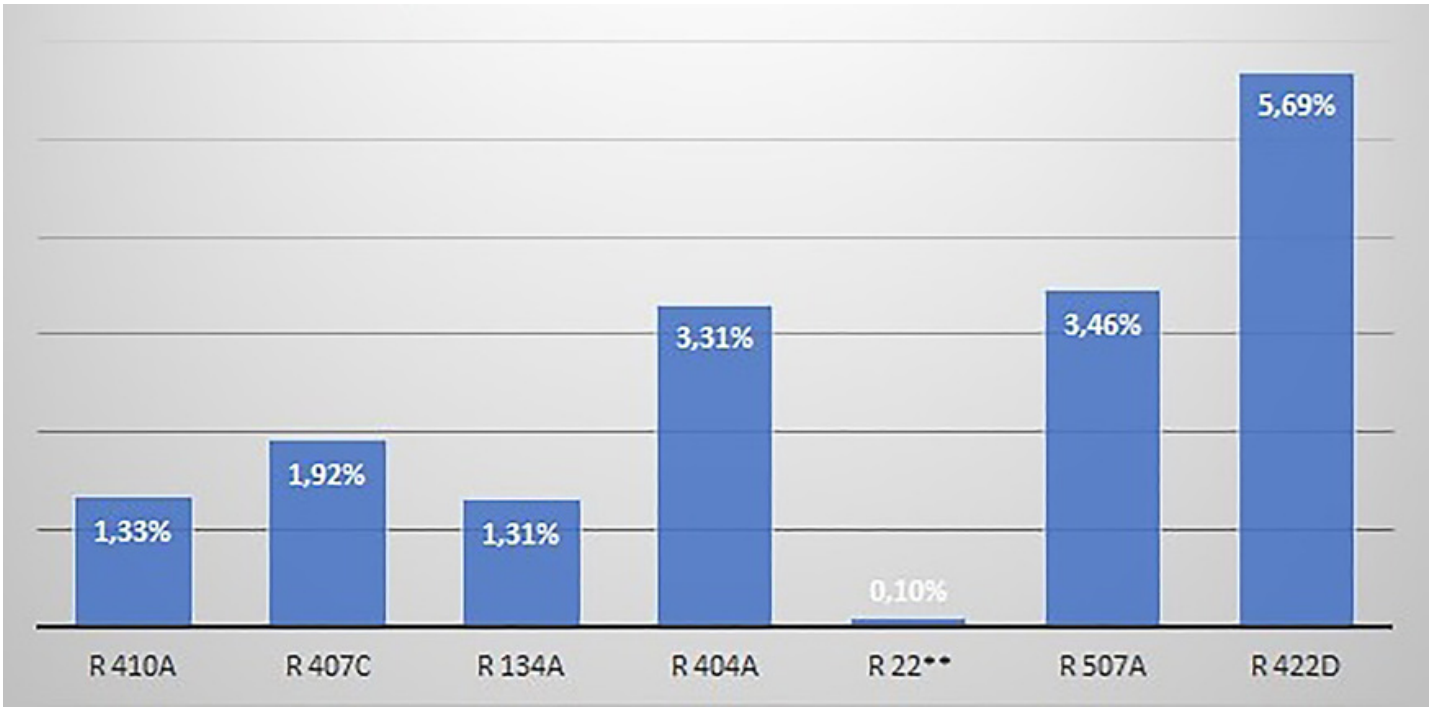
So titelte die Süddeutsche Zeitung im September 2019: „Klimaanlagen sind Klimakiller. In vielen Kühlaggregaten stecken **klimaschädliche fluorhaltige Kältemittel.** Durch Risse können sie in die Atmosphäre gelangen."

Und im Juli 2020 sendete das ZDF in der Reihe „planet e." den Beitrag „Klimakiller Klimaanlagen", in dem das Umweltbundesamt zu Wort kommt. Dort erklärt Dr. Daniel de Graaf: „Im Schnitt **entweichen bei jeder Split-Klimaanlage im Jahr etwa 5 % des Kältemittels** – bei der Befüllung, im Betrieb durch Lecks, bei der Wartung und der Entsorgung."



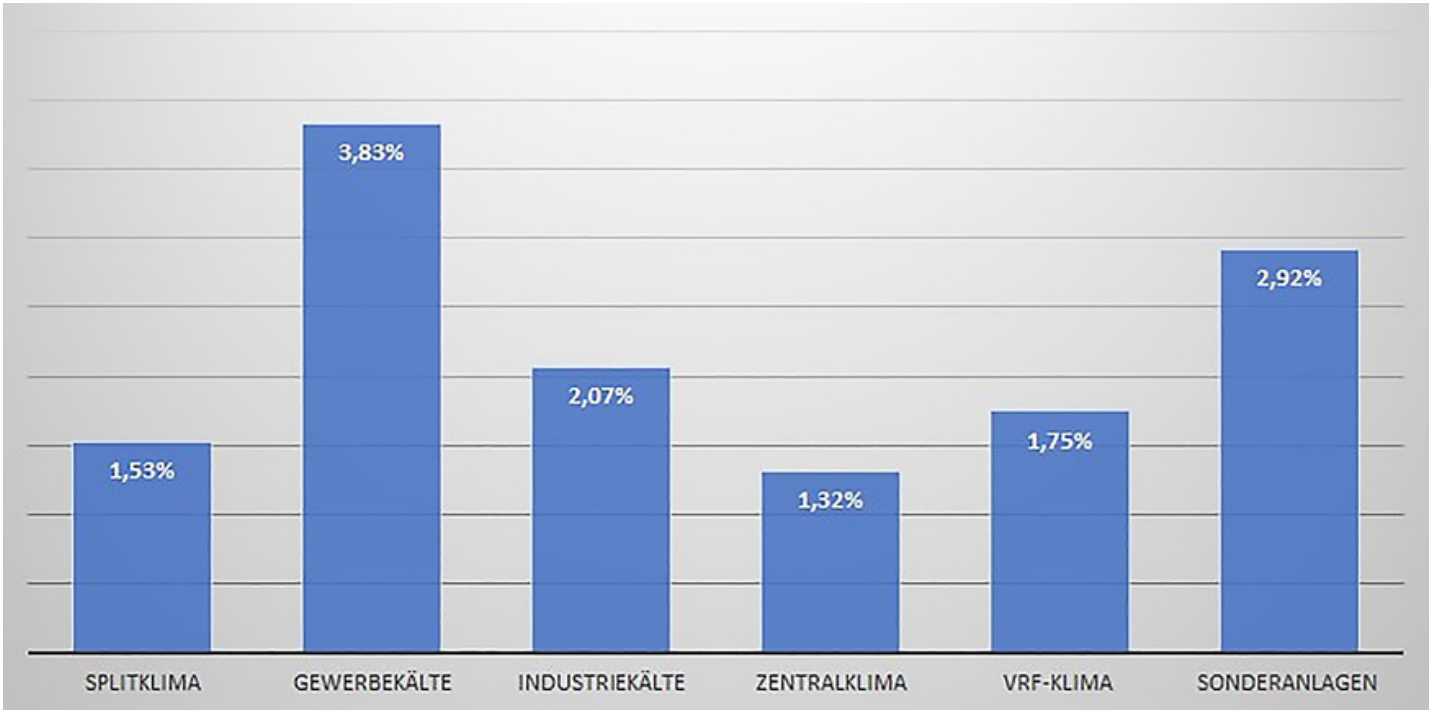
© VDKF

Bild 2 Durchschnittliche Leckageraten aller ausgewerteten Anlagen in Deutschland für die Jahre 2014 bis 2018. Quelle: VDKF, Auswertung Monitoring Daten mit Stand 22. Mai 2019.



© VDKF

Bild 3 Emissionsraten von Kälteanlagen mit bestimmten Kältemitteln befüllt, Durchschnittswerte der Jahre 2014 bis 2018. Quelle: VDKF; Monitoring-Auswertung mit Stand 22. Mai 2019. **Nachfüllverbot ab 01. Januar 2015 in Kraft.



© VDKF

Bild 4 Durchschnittliche Emissionsraten aus Kälteanlagen (2014 bis 2018), bezogen auf die Art der Kälteanlagen / Nutzung (gerundete Werte). Quelle: VDKF; Monitoring-Auswertung mit Stand 22. Mai 2019.

Der überwiegende Teil der **R410A-Anlagen** ist bei VRF-Klima (12 987 Anlagen) und bei Split-Klima (70 092 Anlagen) angesiedelt (Stand der anwendergruppen- und füllmengenbezogenen **Leckageraten** vom 22. Mai 2019). Die durchschnittlichen Leckageraten (inklusive Havarien) aller Anlagen in Deutschland der Jahre 2014 bis 2018 liegen konstant zwischen 2 %/a und ca. 3 %/a (**Bild 2**). Die **Auswertung** zeigt, dass R422D-, R507A- und R404A-Anlagen relativ hohe durchschnittliche Leckageraten, R134a- und R410A-Anlagen jedoch relativ niedrige Werte aufweisen (**Bild 3**).

Die Leckagen in den Bereichen **Gewerbekälte** (3,83 %/a) und **Sonderanlagen** (2,92 %/a) sind nach wie vor überdurchschnittlich hoch. Stark unter dem Durchschnitt liegen Split-Klima (1,53 %/a), Zentralklima (1,32 %/a) und VRF-Anlagen (1,75 %/a), alle weisen also eine **besonders hohe Dichtheit** auf (**Bild 4**).

Die Zahlen zeigen, dass Anlagen, die aus der Serienfertigung stammen und nach dem **Plug-and-play-Prinzip** installiert werden können, eine niedrigere Leckagerate als individuell erstellte Anlagen – die nach wie vor in der **Gewerbekälte** noch häufig zum Einsatz kommen – aufweisen. Zwischen den erfassten **Leckageraten** von 1,53 %/a im Split-Klimabereich und den hierfür vom Umweltbundesamt kommunizierten Leckagen von 5 %/a (siehe Info-Kasten) liegt eine große **Diskrepanz**.

Gesetze und Regeln rund um Kältemittel

Gesetzliche Regelungen, wie die EU-weit verbindliche **F-Gase-Verordnung** (EU-Verordnung 517/2014 über fluorierte Treibhausgase), sowie höhere Anforderungen an die **Energieeffizienz** und **Klimaverträglichkeit** der Systeme haben dazu geführt, dass sich der Markt hin zu Kältemitteln mit niedrigem GWP entwickelt hat. Denn die F-Gase-Verordnung schreibt eine Begrenzung der **CO_2-Äquivalente** (Kältemittelmenge × GWP) der insgesamt in der EU neu in der Verkehr gebrachten Menge fluorierter Treibhausgase inklusive solcher als Kältemittel eingesetzten Stoffe vor. Bis 2030 erfolgt eine **schrittweise Reduktion** der Obergrenze auf ein Fünftel bezogen auf die Menge im Basisjahr 2015. Obergrenzen für bestimmte Anwendungen oder einzelne Länder gibt es dabei nicht.

Um die Umsetzung der F-Gase-Verordnung sicherzustellen, sind Technologien zur Senkung der technisch erforderlichen **Kältemittelmenge** sowie praxistaugliche **Niedrig-GWP-Kältemittel** heute verfügbar. Daikin hat bereits im Jahr 2013 als erster Hersteller im Bereich Split-Klima auf das **Kältemittel R32** gesetzt. Nachdem der gesamte **Split-Klimabereich** von Daikin bereits auf R32 umgestellt wurde, folgt nun das **VRV-Portfolio** mit der Einführung der neuen Serie VRV 5 S für das Heizen und Kühlen kleinerer gewerblicher Anwendungen.

Das **Kältemittel R32** (Difluormethan) bringt mehrere Vorteile mit. Dazu gehören das niedrige GWP von 675 (ein Drittel des GWP von R410A) sowie der geringere Stromverbrauch der Systeme. R32 ist ein **Reinstoff-Kältemittel,** das problemlos gehandhabt werden kann. Es ist aufgrund seiner **geringen Entflammbarkeit** als A2L-Kältemittel klassifiziert und kann gefahrlos in einer Vielzahl von Systemen eingesetzt werden. Weiterhin ist die **Kältemittelfüllmenge** für R32 circa 10 % geringer als für R410A (R410A ist ein azetropes Gemisch aus 50 % R32 und 50 % R125.)

Sichere Produkte: Leckagen bestmöglich verhindern

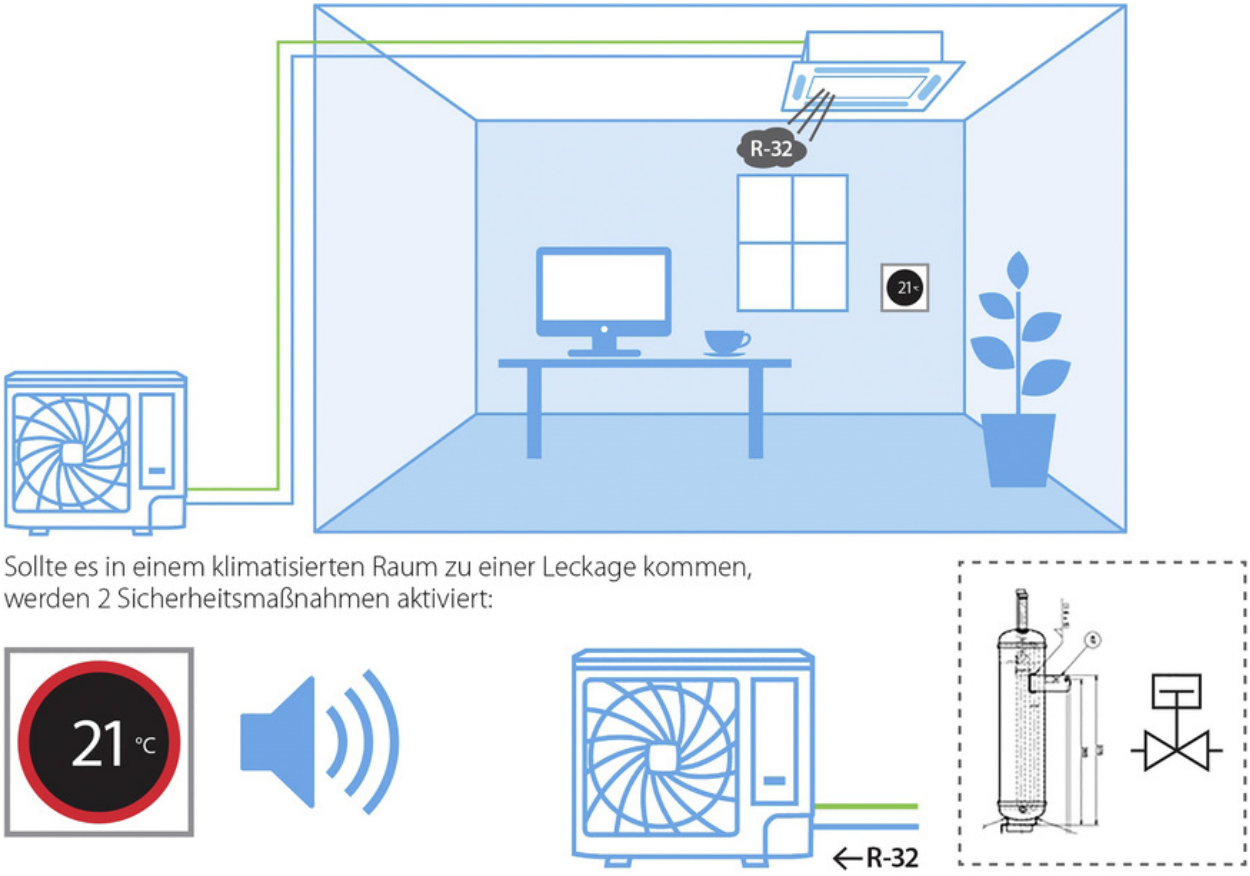
Alle in Verkehr gebrachten Geräte und Anlagen müssen sicher sein. Das bedeutet auch, dass **Leckagen** bestmöglich zu verhindern sind. Wie ein Hersteller dies erreicht, bleibt ihm überlassen. Normen (technische Regelwerke) vereinfachen grundsätzlich die Einhaltung der **Sicherheitsanforderungen**, da sie klare Vorgaben enthalten. Hersteller können aber, basierend auf ihrer eigenen **Risikobewertung**, weitere Sicherheitsmaßnahmen ergänzen. Dies ist immer dann sinnvoll, wenn **Normen** noch nicht dem neuesten Stand der technischen Entwicklung Rechnung tragen.

In Bezug auf die **VRF/VRV-Technologie** gibt es zwei Normen, die für diesen Anwendungsbereich gelten: EN 378 „Kälteanlagen und Wärmepumpen – Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen“ sowie der Produktstandard für Klimaanlagen und Wärmepumpen IEC 60 335-2-40. Beide Normen behandeln Sicherheitsvorschriften bezüglich der **Entflammbarkeit**. Nur EN 378 befasst sich auch mit der **Toxizität** von Kältemitteln. Allerdings weist EN 378 darauf hin, spezifische Produktstandards anzuwenden, sofern diese vorhanden sind. Es gilt dabei die Regel, dass diese spezifischen **Produktstandards** (IEC 60 335-2-40) Vorrang vor allgemeinen Normen (EN 378) haben.

Bei der neuen Serie **VRV 5 S** hat Daikin deshalb im Bereich der **Entflammbarkeit** die IEC 60 335-2-40 angewendet, womit gleichzeitig die Anforderung bezüglich der **Toxizität** aus EN 378 erfüllt wird. Die IEC 60 335-2-40 gibt klare Informationen darüber, welche **Sicherheitsvorkehrungen** erforderlich sind und wie sie funktionieren müssen – zum Beispiel die Position eines Sensors im Raum, dessen Reaktionszeit sowie Gegenmaßnahmen.

Dies beinhaltet, dass in den **Installationsanweisungen** die einzuhaltenden **Mindestraumgrößen** bezogen auf die **R32-Füllmenge** aufgeführt sind. Zusätzliche Unterstützung bei der Auslegung der Systeme wird durch die **Planungssoftware** zur Verfügung gestellt. Werden die Vorgaben bei der Installation eingehalten, handelt es sich um eine sichere Installation, für die Daikin die Verantwortung als Hersteller übernimmt.

Sicherheitsmerkmale für den Betrieb mit A2L-Kältemittel integrieren



©
Daikin

Bild 5 Das in der Serie VRV 5 S werkseitig integrierte Sicherheitssystem wurde speziell für das Kältemittel R32 entwickelt.

Einzigartig im VRF/VRV-Bereich ist das bei der neuen Serie VRV 5 S werkseitig integrierte **Sicherheitssystem** (**Bild 5**), das speziell für das Kältemittel R32 entwickelt wurde. Ab Werk sind alle notwendigen Sicherheitseinrichtungen für den Betrieb mit diesem **A2L-Kältemittel** integriert, sodass bereits Räumlichkeiten ab 10 m^2 klimatisiert werden können.

So verfügt das System über ein spezielles akustisches und visuelles **Kältemittelalarm-Management** über die Madoka-Fernbedienung (**Bild 6**). In den Innengeräten sind **Leckagesensoren** verbaut. Im seltenen Fall einer Leckage schaltet das System sofort ab und sendet einen Alarm. Gleichzeitig saugt das Außengerät das gesamte Kältemittel aus der Anlage ab und sperrt anschließend den Betrieb, sodass kein weiteres Kältemittel in den Raum strömen kann.

© Daikin

Bild 6 Die Serie VRV 5 S verfügt über ein spezielles akustisches und visuelles Kältemittelalarm-Management über die Fernbedienung Madoka. Im seltenen Fall einer Leckage schaltet das System sofort ab und sendet einen Alarm.

Auch zentrale **Regelungskomponenten** wie der „intelligent Touch Manager" (iTM) oder der „intelligent Tablet Controller" (iTab) geben einen Alarm aus. Und die **Auslegungssoftware** VRV express informiert den Planer schon im Vorfeld, ob das geplante System den gesetzlichen Anforderungen in Bezug auf die zulässige Kältemittelfüllmenge und Raumgröße entspricht.

Da alle Sicherheitsvorkehrungen im System integriert sind, ist eine hohe Flexibilität mit einer **Rohrleitungslänge** von bis zu 300 m und bei der Raumauswahl gegeben. So können unter bestimmten Auslegungsvoraussetzungen **bereits Raumgrößen ab 10 m^2** realisiert werden. Ohne diese Sicherheitsmaßnahmen wäre der Einsatz deutlich unflexibler, weil größere Räume ab 26,5 m^2 nötig wären. Somit lässt sich die Serie VRV 5 S aufgrund der R32-Sicherheitsvorkehrungen in der **Planung** und **Ausführung** genauso einfach wie ein VRV-System mit R410A handhaben.

Aber eine **Leckage bei einem VRV-5-S-System** hätte aufgrund der Kältemitteleigenschaften und der Sicherheitsvorkehrungen einen signifikant geringeren **CO_2-Äquivalent-Eintrag** in die Atmosphäre als dies bei einem vergleichbaren R410A-System der Fall wäre.

VRV/VRF: Technologie für die Energiewende

Durch ihre hohe **Primärenergieausnutzung** und die **Antriebsenergie** Strom sind VRV/VRF-Systeme heute bereits ein wesentlicher Baustein zur Umsetzung der **Energiewende** im Gebäudebereich. Denn **Klimatechnik** kann mittlerweile viel mehr als ein angenehmes Raumklima schaffen.

Durch den Einsatz des **Niedrig-GWP-Kältemittels R32**, die Nutzung von Luft, Erdwärme oder Abwasser als **erneuerbare Energiequellen** sowie die interne Nutzung von **Prozessabwärme** trägt sie zur energieeffizienten, CO_2-armen und umweltfreundlichen Kühlung, Beheizung und Lüftung von Gebäuden bei und kann hier die **fossilen Energieträger** Heizöl und Erdgas mit Vorteilen für das Klima ersetzen. Mit der fortschreitenden Dekarbonisierung der Stromerzeugung vergrößert sicher der Vorteil.

Dem **Vorurteil**, Klimatechnik sei klimaschädlich, können und müssen wir als Branche ganz entschieden etwas entgegensetzen. Die Lösungen dafür existieren.

Dieser Artikel erschien zuerst in der Heftausgabe 12-2020 des TGA Fachplaners unter dem Titel „Sind Klimaanlagen wirklich Klimakiller?“ von Volker Weinmann.

Das könnte Sie interessieren:

GEG gibt freie Fahrt für VRV/VRF-Technik
Corona-gerechte Umrüstung von Klimaanlagen
DIN SPEC 4108-8: Lüftungskonzept mit Fensterlüftung erstellen

---

URL: https://www.tga-fachplaner.de/klimatechnik/niedrig-gwp-kaeltemittel-leckageraten-von-kaeltemitteln-sind-klimaanlagen-klimakiller

Anhang 19

Berechnung einer Stundenanzahl in einem definierten Temperaturbereich

Quelle DWD

https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/klarchivstunden.html;jsessionid=E9840DC77FBC655D61D68BE69D68B537.live11052?nn=16102

Kontrollsumme (8760 h) 8760 h

Stations_ID;Stationsname;Von_Datum;Bis_Datum

3987;Potsdam ;18930101;

Ermittelte Summen: 2740 h | 4963 h | 1057 h

Originaler Datensatz				Formatierung Temperatur			Stunden t<Wert		Stunden von … bis		Stunden>Wert	
Stations ID+Datum		Temperatur		Komma	Text	Zahl	Stunden t<Wert		Stunden von … bis		Stunden>Wert	
	QN_9		RF_TT	entf.	Format.	Format.	5	°C	5	20	20	°C
3987;2021010100;	3;	1.3;	92.0;eor	1,3;	1,3	1,3	1		0		0	
3987;2021010101;	3;	1.2;	90.0;eor	1,2;	1,2	1,2	1		0		0	
3987;2021010102;	3;	1.4;	87.0;eor	1,4;	1,4	1,4	1		0		0	
3987;2021010103;	3;	1.3;	86.0;eor	1,3;	1,3	1,3	1		0		0	
3987;2021010104;	3;	1.2;	87.0;eor	1,2;	1,2	1,2	1		0		0	
3987;2021010105;	3;	1.1;	87.0;eor	1,1;	1,1	1,1	1		0		0	
3987;2021010106;	3;	1.1;	87.0;eor	1,1;	1,1	1,1	1		0		0	
3987;2021010107;	3;	0.7;	91.0;eor	0,7;	0,7	0,7	1		0		0	
3987;2021010108;	3;	0.7;	96.0;eor	0,7;	0,7	0,7	1		0		0	
3987;2021010109;	3;	1.0;	97.0;eor	1,0;	1,0	1	1		0		0	
3987;2021010110;	3;	1.5;	96.0;eor	1,5;	1,5	1,5	1		0		0	
3987;2021010111;	3;	1.9;	94.0;eor	1,9;	1,9	1,9	1		0		0	
3987;2021010112;	3;	2.3;	94.0;eor	2,3;	2,3	2,3	1		0		0	
3987;2021010113;	3;	2.5;	93.0;eor	2,5;	2,5	2,5	1		0		0	
3987;2021010114;	3;	2.5;	93.0;eor	2,5;	2,5	2,5	1		0		0	

+ ca 8700 weitere Zeilen

3987;2021123104;	3;	11.5;	97.0;eor	11,5;	11,5	11,5	0		1		0	
3987;2021123105;	3;	12.0;	93.0;eor	12,0;	12,0	12	0		1		0	
3987;2021123106;	3;	12.3;	89.0;eor	12,3;	12,3	12,3	0		1		0	
3987;2021123107;	3;	12.4;	87.0;eor	12,4;	12,4	12,4	0		1		0	
3987;2021123108;	3;	12.2;	88.0;eor	12,2;	12,2	12,2	0		1		0	
3987;2021123109;	3;	12.6;	86.0;eor	12,6;	12,6	12,6	0		1		0	
3987;2021123110;	3;	12.6;	85.0;eor	12,6;	12,6	12,6	0		1		0	
3987;2021123111;	3;	12.4;	86.0;eor	12,4;	12,4	12,4	0		1		0	
3987;2021123112;	3;	12.8;	83.0;eor	12,8;	12,8	12,8	0		1		0	
3987;2021123113;	3;	12.7;	83.0;eor	12,7;	12,7	12,7	0		1		0	
3987;2021123114;	3;	13.1;	79.0;eor	13,1;	13,1	13,1	0		1		0	
3987;2021123115;	3;	13.0;	79.0;eor	13,0;	13,0	13	0		1		0	
3987;2021123116;	3;	12.0;	88.0;eor	12,0;	12,0	12	0		1		0	
3987;2021123117;	3;	11.4;	94.0;eor	11,4;	11,4	11,4	0		1		0	
3987;2021123118;	3;	11.3;	96.0;eor	11,3;	11,3	11,3	0		1		0	
3987;2021123119;	3;	11.3;	97.0;eor	11,3;	11,3	11,3	0		1		0	
3987;2021123120;	3;	11.3;	98.0;eor	11,3;	11,3	11,3	0		1		0	
3987;2021123121;	3;	11.2;	98.0;eor	11,2;	11,2	11,2	0		1		0	
3987;2021123122;	3;	11.1;	99.0;eor	11,1;	11,1	11,1	0		1		0	
3987;2021123123;	3;	11.2;	98.0;eor	11,2;	11,2	11,2	0		1		0	
						Summe	2740					
								Summe	4963			
										Summe	1057	
							Kontrollsumme		8760			

Anhang 20

Berechnung der ökologischen Effizienz des einstufigen Kreislaufs

Berechnungsbedingungen

Kälteleistung Kühlraum		5	kW
Anl. Lebensd.		15	Y
tägliche Laufzeit bei COP 45°C		18	h
Betriebsstunden zu 40°C t_c		1057	h
Betriebsstunden zu 30°C t_c		4963	h
Betriebsstunden zu 20°C t_c		2740	h
CO2 Emissionen pro erzeugter kWH		0,411	kg_{CO2}/kWh
Leckrate	3,83 %	0,0383	
Recyclingverluste	10 %	0,1	

Füllmengenfaktor 1	0,25	kg/kW
Füllmengen1	1,25	kg
Leckageverluste über 15 Jahre	0,718	kg
Recylingsverluste nach 15 Jahren	0,125	kg
Füllmengenfaktor 2	0,5	kg/kW
Füllmengen 2	2,5	kg
Leckageverluste über 15 Jahre	1,436	kg
Recylingsverluste nach 15 Jahren	0,25	kg
Füllmengenfaktor 3	1	kg/kW
Füllmengen 3	5	kg
Leckageverluste über 15 Jahre	2,873	kg
Recylingsverluste nach 15 Jahren	0,5	kg

Füllmengenfaktor 4	2	kg/kW
Füllmengen 4	10	kg
Leckageverluste über 15 Jahre	5,745	kg
Recylingsverluste nach 15 Jahren	1	kg
Füllmengenfaktor 5	4	kg/kW
Füllmengen 5	20	kg
Leckageverluste über 15 Jahre	11,49	kg
Recylingsverluste nach 15 Jahren	2	kg

Ergebnisse zur TEWI Berechnung des einstufigen Prozesses

	Kältemitte	GWP Wert	COP bei 45°C	COP bei 40°C	COP bei 30°C	COP bei 20°C	Kälteleistung der Kältemaschine bei 18h Laufzeit	Leistungsaufnahme Kältemaschine bei $COP_{45°C}$ in kW	mit Faktor reduzierte Betribesstunden zu t_c = 40 °C	mit Faktor reduzierte Betribesstunden zu t_c = 30 °C	mit Faktor reduzierte Betribesstunden zu t_c = 20 °C	Jahresenergiebedarf in kWh	TEWI Durch Energiebedarf	Gesamt TEWI bei Füllmengenfaktor 1	Gesamt TEWI bei Füllmengenfaktor 2	Gesamt TEWI bei Füllmengenfaktor 3	Gesamt TEWI bei Füllmengenfaktor 4	Gesamt TEWI bei Füllmengenfaktor 5
														0,25	0,5	1	2	4
1	R404A	3922	0,94	1,078	1,42	1,867	6,67	7,12	688	2459	1030,17	29761	183474	186781	190088	196701	209928	236382
2	R 32	675	1,09	1,22	1,53	1,948	6,67	6,09	711,4	2670	1154,81	27621	170286	170855	171425	172563	174839	179392
3	R 407F	1825	0,98	1,099	1,37	1,734	6,67	6,78	709,3	2665	1165,51	30767	189679	191218	192757	195834	201989	214299
4	R 410A	2088	1,03	1,167	1,49	1,926	6,67	6,45	701,8	2582	1102,17	28304	174495	176255	178016	181537	188578	202662
5	R 448A	1387	0,96	1,081	1,36	1,725	6,67	6,92	706,3	2636	1147,03	31078	191594	192763	193933	196271	200949	210304
6	R 449A	1397	0,97	1,088	1,37	1,743	6,67	6,88	705,6	2629	1141,67	30808	189931	191109	192287	194643	199354	208777
7	R 452A	2140	0,90	1,031	1,34	1,743	6,67	7,41	691,9	2501	1060,78	31508	194246	196050	197854	201463	208680	223114
8	R 452B	698	1,06	1,183	1,49	1,906	6,67	6,31	707,8	2639	1139,15	28308	174517	175106	175694	176871	179225	183933
9	R 454A	239	0,95	1,072	1,35	1,716	6,67	6,99	705,7	2630	1142,62	31280	192844	193046	193247	193650	194456	196068
10	R 454B	467	1,06	1,184	1,49	1,902	6,67	6,30	708,5	2646	1143,57	28335	174688	175082	175476	176263	177838	180988
11	R1270	2	1,10	1,242	1,58	2,027	6,67	6,04	704,7	2609	1119,68	26765	165006	165007	165009	165012	165019	165033
12	R290	3	1,11	1,247	1,58	2,027	6,67	6,00	706,1	2620	1125,62	26730	164793	164795	164798	164803	164813	164833
13	R 744	1	0,62	0,714	1,02	1,485	6,67	10,79	686,2	2262	854,883	41036	252989	252990	252991	252992	252996	253002
14	R469A	1357	0,71	0,813	1,04	1,309	6,67	9,37	694	2555	1117,03	40902	252164	253308	254452	256740	261317	270470

Anhang 21

Mittelwertbildung vom Wirkungsgrad des VDI des zweistufigen Kältekreislaufes und der Kaskade

Berechnete Einzel-wirkungsgrade	Verdichtertyp
62,1	HSK5363-40-40P
66,8	HSK6451-50-40P
68,8	ESH736Y-40S
68,9	ESH725Y-40S
70,5	ESH743Y-40S

Mittelwert
67,42

****

BITZER Software v6.17.8 rev2725

(c) 2022, BITZER, Germany. Alle Angaben ohne Gewähr.

Montag, 15. August 2022 22:05:10

****

Verdichterauslegung: Scroll-Verdichter

Vorgabewerte:

Kälteleistung	20,00 kW	
Kältemittel	R404A	
Bezugstemperatur	Taupunkt	
Verdampfung	0 °C	
Verflüssigung	45,0 °C	
Flüss.unterk. (im Verfl.)	0 K	
Sauggasüberhitzung	10,00 K	
Netzversorgung	400V-3-50Hz	
Nutzbare Überhitzung	100%	

Ergebnis

Verdichter	ESH725Y-40S	
Leistungsstufen	100%	
Kälteleistung	20,4	kW
Kälteleistung *	21,1	kW
Verdampferleist.	20,4	kW
Leistungsaufnahme	7,12	kW
Strom (400V)	12,41	A
Spannungsbereich	380-420V	
Verflüssigerleistung	27,5	kW
Leistungszahl	2,86	
Leistungszahl *	2,96	
Massenstrom	685	kg/h
Druckgastemp. ungekühlt	68	°C

Kleinster Verdichtertyp

*nach EN12900 (20°C Sauggastemp., 0K Flüssigkeitsunterkühlung)

Berechnung des Verdichterwirkungsgrades

Gegeben

Kältemittel	R404A		Refprop.R404A.MIX
Verdampfung	0 °C		273,15 K
Verflüssigung	45 °C		318,15 K
Sauggastemperatur	10 °C		283,15 K
Q0	20,4 kW		
Pel	7,12 kW		

Berechnet

Hochdruck	20,59284499	bar	2059284,499	Pa
Saugdruck	6,003294762	bar	600329,4762	Pa
Entropie VDI Ansaug			1707,471097	J/kgK
Enthalpie am VDI Ansaug			374,2089632	kJ/kg
IsentropeEnthalpie VDI Ausgang			399,9969616	kJ/kg
Isentrope VDI Arbeit			25,78799839	kJ/kg
Enthalpie bei Druckgastemp. Ungekühlt				kJ/kg
Enthalpiedifferenz real				kJ/kg
massenstrom	685	kg/h	0,190277778	kg/s
Enthalpiedifferenz			37,4189781	kJ/kg
			0,689168964	

****

BITZER Software v6.17.8 rev2725

(c) 2022, BITZER, Germany. Alle Angaben ohne Gewähr.

Montag, 15. August 2022 22:26:20

****

Verdichterauslegung: Scroll-Verdichter

Vorgabewerte:

Kälteleistung	30,0 kW
Kältemittel	R404A
Bezugstemperatur	Taupunkt
Verdampfung	0 °C
Verflüssigung	45,0 °C
Flüss.unterk. (im Verfl.)	0 K
Sauggasüberhitzung	10,00 K
Netzversorgung	400V-3-50Hz
Nutzbare Überhitzung	100%

Ergebnis

Verdichter	ESH736Y-40S		ESH743Y-40S	
Leistungsstufen	100%		100%	
Kälteleistung	29,4	kW	36,5	kW
Kälteleistung *	30,3	kW	37,7	kW
Verdampferleist.	29,4	kW	36,5	kW
Leistungsaufnahme	10,26	kW	12,46	kW
Strom (400V)	17,78	A	21,5	A
Spannungsbereich	380-420V		380-420V	
Verflüssigerleistung	39,6	kW	49	kW
Leistungszahl	2,86		2,93	
Leistungszahl *	2,96		3,03	
Massenstrom	986	kg/h	1227	kg/h
Druckgastemp. ungekühlt	68	°C	67,3	°C

---

*nach EN12900 (20°C Sauggastemp., 0K Flüssigkeitsunterkühlung)

Berechnung des Verdichterwirkungsgrades für ESH736Y-40S

Gegeben

Kältemittel	R404A		Refprop.R404A.MIX	
Verdampfung	0	°C	273,15	K
Verflüssigung	45	°C	318,15	K
Sauggastemperatur	10	°C	283,15	K
Q0	29,4	kW		
Pel	10,26	kW		

Berechnet

Hochdruck	20,592845	bar	2059284,5	Pa
Saugdruck	6,00329476	bar	600329,476	Pa
Entropie VDI Ansaug			1707,4711	J/kgK
Enthalpie am VDI Ansaug			374,208963	kJ/kg
IsentropeEnthalpie VDI Ausgang			399,996962	kJ/kg
Isentrope VDI Arbeit			25,7879984	kJ/kg
Enthalpie bei Druckgastemp. Ungekühlt				kJ/kg
Enthalpiedifferenz real				kJ/kg
massenstrom	986	kg/h	0,27388889	kg/s
Enthalpiedifferenz			37,4604462	kJ/kg
			0,68840606	

Berechnung des Verdichterwirkungsgrades für ESH743Y-40S

Gegeben

Kältemittel	R404A		Refprop.R404A.MIX	
Verdampfung	0	°C	273,15	K
Verflüssigung	45	°C	318,15	K
Sauggastemperatur	10	°C	283,15	K
Q0	36,5	kW		
Pel	12,46	kW		

Berechnet

Hochdruck	20,592845	bar	2059284,5	Pa
Saugdruck	6,00329476	bar	600329,476	Pa
Entropie VDI Ansaug			1707,4711	J/kgK
Enthalpie am VDI Ansaug			374,208963	kJ/kg
IsentropeEnthalpie VDI Ausgang			399,996962	kJ/kg
Isentrope VDI Arbeit			25,7879984	kJ/kg
Enthalpie bei Druckgastemp. Ungekühlt				kJ/kg
Enthalpiedifferenz real				kJ/kg
massenstrom	1227	kg/h	0,34083333	kg/s
Enthalpiedifferenz			36,5574572	kJ/kg
			0,70541007	

****

BITZER Software v6.17.8 rev2725

(c) 2022, BITZER, Germany. Alle Angaben ohne Gewähr.

Montag, 15. August 2022 22:35:53

****

Verdichterauslegung: Halbhermetische Schraubenverdichter HS

Vorgabewerte:

Kälteleistung	100,0 kW
Kältemittel	R404A
Bezugstemperatur	Taupunkt
Verdampfung	0 °C
Verflüssigung	45,0 °C
Flüss.temp. (nach Verfl.)	43,0 °C
Sauggasüberhitzung	10,00 K
Betriebsart	Standard
Netzversorgung	400V-3-50Hz
Nutzbare Überhitzung	100%
Zusatzkühlung	Automatisch
Maximale Druckgastemp.	80,0 °C

Ergebnis

Verdichter	HSK5363-40-40P		HSK6451-50-40P	
Leistungsstufen	100%		100%	
Kälteleistung	90,8	kW	110,3	kW
Kälteleistung *	88,4	kW	107,4	kW
Verdampferleist.	90,8	kW	110,3	kW
Leistungsaufnahme	34,2	kW	38,7	kW
Strom (400V)	53,4	A	62,2	A
Spannungsbereich	380-415V		380-415V	
Verflüssigerleistung	125	kW	149	kW
Leistungszahl	2,65		2,85	
Leistungszahl *	2,58		2,77	
Massenstrom ND	2968	kg/h	3607	kg/h
Massenstrom HD	2968	kg/h	3607	kg/h
Betriebsart	Standard		Standard	
Flüss.temp.	43	°C	43	°C
Ölvolumenstrom	0,96	m³/h	1,25	m³/h
Kühlungsmethode	--		--	
Druckgastemp. ungekühlt	71,3	°C	69	°C

---

*nach EN12900 (10K Sauggasüberhitzung, 0K Flüssigk.unterkühlung)

Berechnung des Verdichterwirkungsgrades für HSK5363-40-40P

Gegeben

Kältemittel	R404A		Refprop.R404A.MIX	
Verdampfung	0	°C	273,15	K
Verflüssigung	45	°C	318,15	K
Sauggastemperatur	10	°C	283,15	K
Q0	90,8	kW		
Pel	34,2	kW		

Berechnet

Hochdruck	20,592845	bar	2059284,5	Pa
Saugdruck	6,00329476	bar	600329,476	Pa
Entropie VDI Ansaug			1707,4711	J/kgK
Enthalpie am VDI Ansaug			374,208963	kJ/kg
IsentropeEnthalpie VDI Ausgang			399,996962	kJ/kg
Isentrope VDI Arbeit			25,7879984	kJ/kg
Enthalpie bei Druckgastemp. Ungekühlt				kJ/kg
Enthalpiedifferenz real				kJ/kg
massenstrom	2968	kg/h	0,82444444	kg/s
Enthalpiedifferenz			41,4824798	kJ/kg
			0,62166	

Berechnung des Verdichterwirkungsgrades für HSK6451-50-40P

Gegeben

Kältemittel	R404A		Refprop.R404A.MIX	
Verdampfung	0	°C	273,15	K
Verflüssigung	45	°C	318,15	K
Sauggastemperatur	10	°C	283,15	K

Berechnet

Hochdruck	20,592845	bar	2059284,5	Pa
Saugdruck	6,00329476	bar	600329,476	Pa
Q0	110,3	kW		
Pel	38,7	kW		
Entropie VDI Ansaug			1707,4711	J/kgK
Enthalpie am VDI Ansaug			374,208963	kJ/kg
IsentropeEnthalpie VDI Ausgang			399,996962	kJ/kg
Isentrope VDI Arbeit			25,7879984	kJ/kg
Enthalpie bei Druckgastemp. Ungekühlt				kJ/kg
Enthalpiedifferenz real				kJ/kg
massenstrom	3607	kg/h	1,00194444	kg/s
Enthalpiedifferenz			38,624896	kJ/kg
			0,66765224	

Anhang 22

Berechnung der ökologischen Effizienz des zweistufigen Kreislaufs

Berechnungsbedingungen

Kälteleistung Kühlraum		5	kW
Anl. Lebensd.		15	Y
tägliche Laufzeit bei COP 45°C		18	h
Betriebsstunden zu 40°C t_c		1057	h
Betriebsstunden zu 30°C t_c		4963	h
Betriebsstunden zu 20°C t_c		2740	h
CO2 Emissionen pro erzeugter kWH		0,411	kg_{CO2}/kWh
Leckrate	3,83 %	0,0383	
Recyclingverluste	10 %	0,1	

Füllmengenfaktor 1	0,25	kg/kW
Füllmengen1	1,25	kg
Leckageverluste über 15 Jahre	0,718	kg
Recylingsverluste nach 15 Jahren	0,125	kg
Füllmengenfaktor 2	0,5	kg/kW
Füllmengen 2	2,5	kg
Leckageverluste über 15 Jahre	1,436	kg
Recylingsverluste nach 15 Jahren	0,25	kg
Füllmengenfaktor 3	1	kg/kW
Füllmengen 3	5	kg
Leckageverluste über 15 Jahre	2,873	kg
Recylingsverluste nach 15 Jahren	0,5	kg

Füllmengenfaktor 4	2	kg/kW
Füllmengen 4	10	kg
Leckageverluste über 15 Jahre	5,745	kg
Recylingsverluste nach 15 Jahren	1	kg
Füllmengenfaktor 5	4	kg/kW
Füllmengen 5	20	kg
Leckageverluste über 15 Jahre	11,49	kg
Recylingsverluste nach 15 Jahren	2	kg

Ergebnisse zur TEWI Berechnung des zweistufigen Prozesses

	Kältemittel	GWP Wert	COP 45°C mit Zwischenkühlung	COP bei 40°C	COP bei 30°C	COP bei 20°C	Kälteleistung der Kältemaschine bei 18h Laufzeit	Leistungsaufnahme Kältemaschine bei $COP_{45°C}$ in kW	mit Faktor reduzierte Betribesstunden zu t_c = 40 °C	mit Faktor reduzierte Betribesstunden zu t_c = 30 °C	mit Faktor reduzierte Betribesstunden zu t_c = 20 °C	Jahresenergiebedarf in kWh	TEWI Durch Energiebedarf	Gesamt TEWI bei Füllmengenfaktor 1	Gesamt TEWI bei Füllmengenfaktor 2	Gesamt TEWI bei Füllmengenfaktor 3	Gesamt TEWI bei Füllmengenfaktor 4	Gesamt TEWI bei Füllmengenfaktor 5
														0,25	0,5	1	2	4
1	R404A	3922	1,41	1,588	2	2,559	6,67	4,712	706,3	2630	1136,21	21077	129940	133247	136553	143167	156394	182848
2	R 32	675	1,64	1,797	2,19	2,729	6,67	4,075	721,7	2780	1231,64	19291	118930	119499	120068	121206	123483	128036
3	R 407F	1825	1,47	1,614	1,96	2,414	6,67	4,539	721,5	2791	1250,47	21619	133279	134818	136356	139434	145588	157898
4	R 410A	2088	1,54	1,711	2,12	2,668	6,67	4,322	714,7	2712	1187,99	19946	122966	124726	126487	130008	137049	151133
5	R 448A	1387	1,44	1,59	1,94	2,397	6,67	4,62	719,6	2771	1236,9	21841	134648	135817	136987	139326	144003	153358
6	R 449A	1397	1,45	1,598	1,95	2,419	6,67	4,599	719	2764	1231,66	21685	133685	134863	136041	138396	143108	152530
7	R 452A	2140	1,38	1,537	1,92	2,416	6,67	4,843	710,2	2675	1170,65	22062	136014	137818	139623	143231	150448	164883
8	R 452B	698	1,57	1,731	2,12	2,647	6,67	4,245	719,2	2758	1219,47	19936	122907	123496	124084	125262	127616	132324
9	R 454A	239	1,43	1,58	1,93	2,388	6,67	4,651	719,1	2766	1233,53	21950	135324	135526	135727	136130	136936	138548
10	R 454B	467	1,57	1,732	2,12	2,641	6,67	4,24	719,7	2764	1223,3	19957	123035	123429	123822	124610	126185	129335
11	R1270	2	1,59	1,761	2,17	2,726	6,67	4,185	717,2	2734	1200,86	19468	120021	120022	120024	120027	120034	120048
12	R290	3	1,58	1,745	2,15	2,709	6,67	4,224	717,1	2731	1197,31	19623	120976	120978	120981	120986	120996	121016
13	R 744	1	1,02	1,172	1,66	2,267	6,67	6,548	688,9	2284	922,875	25510	157267	157268	157269	157270	157274	157280
14	R469A	1357	1,42	1,577	1,92	2,323	6,67	4,69	714,5	2762	1257,7	22202	136874	138018	139162	141451	146027	155180

Anhang 23

Berechnung der ökologischen Effizienz der Kaskade

Berechnungsbedingungen

Kälteleistung Kühlraum		5	kW
Anl. Lebensd.		15	Y
tägliche Laufzeit bei COP 45°C		18	h
Betriebsstunden zu 40°C t_c		1057	h
Betriebsstunden zu 30°C t_c		4963	h
Betriebsstunden zu 20°C t_c		2740	h
CO2 Emissionen pro erzeugter kWH		0,411	kg_{CO2}/kWh
Leckrate	3,83 %	0,0383	
Recyclingverluste	10 %	0,1	

Füllmengenfaktor 1	0,25	kg/kW
Füllmengen1	1,25	kg
Leckageverluste über 15 Jahre	0,718	kg
Recylingsverluste nach 15 Jahren	0,125	kg
Füllmengenfaktor 2	0,5	kg/kW
Füllmengen 2	2,5	kg
Leckageverluste über 15 Jahre	1,436	kg
Recylingsverluste nach 15 Jahren	0,25	kg
Füllmengenfaktor 3	1	kg/kW
Füllmengen 3	5	kg
Leckageverluste über 15 Jahre	2,873	kg
Recylingsverluste nach 15 Jahren	0,5	kg

Füllmengenfaktor 4	2	kg/kW
Füllmengen 4	10	kg
Leckageverluste über 15 Jahre	5,745	kg
Recylingsverluste nach 15 Jahren	1	kg
Füllmengenfaktor 5	4	kg/kW
Füllmengen 5	20	kg
Leckageverluste über 15 Jahre	11,49	kg
Recylingsverluste nach 15 Jahren	2	kg

Ergebnisse zur TEWI Berechnung der Kaskade

	Kältemittel der Tieftemperaturstufe	GWP Wert	COP bei 45°C mit IWÜ und Zwischenkühlung 1. Fall	COP bei 40°C	COP bei 30°C	COP bei 20°C	Kälteleistung der Kältemaschine bei 18h Laufzeit	Leistungsaufnahme Kältemaschine bei $COP_{45°C}$ in kW	mit Faktor reduzierte Betribesstunden zu t_c = 40 °C	mit Faktor reduzierte Betribesstunden zu t_c = 30 °C	mit Faktor reduzierte Betribesstunden zu t_c = 20 °C	Jahresenergiebedarf in kWh	TEWI Durch Energiebedarf	Gesamt TEWI bei Füllmengenfaktor 1	Gesamt TEWI bei Füllmengenfaktor 2	Gesamt TEWI bei Füllmengenfaktor 3	Gesamt TEWI bei Füllmengenfaktor 4	Gesamt TEWI bei Füllmengenfaktor 5
														0,25	0,5	1	2	4
1	R404A	3922	1,42	1,564	1,91	2,362	6,67	4,689	720,6	2775	1236,79	22194	136825	140132	143438	150052	163279	189733
2	R 32	675	1,56	1,696	2,03	2,479	6,67	4,282	727,6	2852	1290,45	20854	128564	129133	129702	130840	133117	137670
3	R 407F	1825	1,38	1,505	1,8	2,18	6,67	4,828	727,1	2856	1301,86	23587	145412	146950	148489	151566	157721	170031
4	R 410A	2088	1,51	1,649	1,99	2,443	6,67	4,421	724,8	2821	1268,58	21288	131238	132998	134758	138279	145321	159405
5	R 448A	1387	1,37	1,493	1,79	2,172	6,67	4,873	726,2	2846	1294,27	23716	146210	147380	148549	150888	155565	164921
6	R 449A	1397	1,38	1,502	1,8	2,191	6,67	4,846	725,9	2841	1290,38	23542	145135	146313	147491	149846	154558	163980
7	R 452A	2140	1,36	1,494	1,81	2,221	6,67	4,896	722,5	2802	1259,76	23423	144402	146206	148011	151619	158836	173271
8	R 452B	698	1,51	1,645	1,98	2,413	6,67	4,423	726,4	2841	1283,87	21455	132272	132861	133449	134626	136980	141688
9	R 454A	239	1,37	1,496	1,79	2,176	6,67	4,865	726,3	2847	1294,33	23680	145987	146189	146390	146793	147599	149211
10	R 454B	467	1,51	1,643	1,97	2,407	6,67	4,428	726,6	2843	1285,72	21498	132533	132927	133321	134108	135683	138833
11	R1270	2	1,52	1,664	2,01	2,471	6,67	4,385	724,3	2816	1264,54	21068	129882	129883	129885	129888	129895	129909
12	R290	3	1,50	1,642	1,99	2,454	6,67	4,452	722,9	2801	1254,03	21270	131127	131129	131132	131137	131147	131167
13	R 744*	1	1,42	1,557	1,89	2,332	6,67	4,693	723,1	2801	1251,91	22413	138176	138176	138177	138179	138182	138189
14	R469A	1357	1,22	1,315	1,54	1,82	6,67	5,479	733,7	2941	1373,81	27661	170532	171676	172820	175109	179685	188838

* COP Werte 2. Fall Berechnung