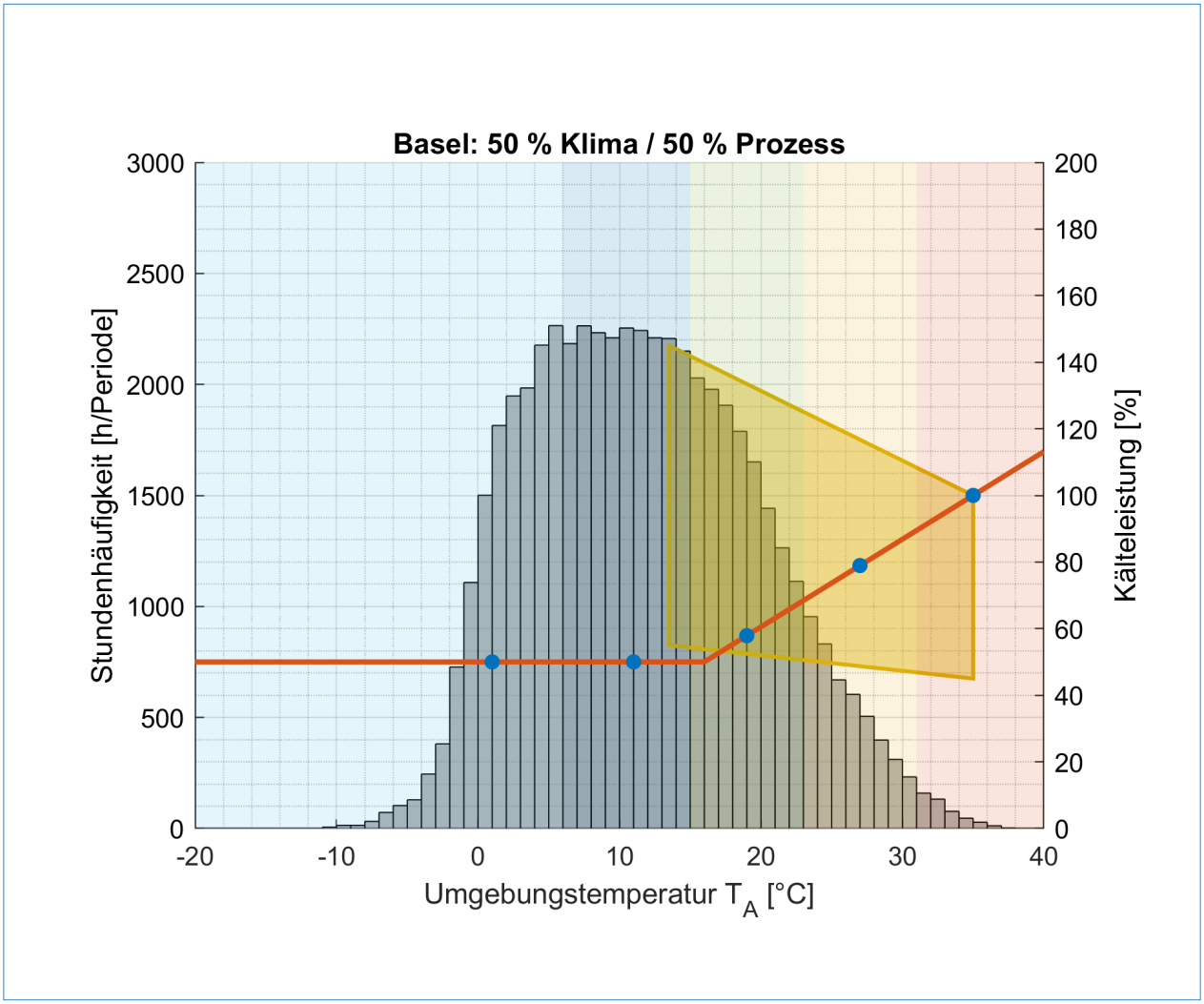
24. Februar 2022

Kälteverdichter: Schlüssel zu Energieeffizienz und Betriebssicherheit



EnergieSchweiz
Bundesamt für Energie BFE

Pulverstrasse 13
CH-3063 Ittigen

Postadresse:
CH-3003 Bern

Infoline 0848 444 444
energieschweiz.ch

Autoren
Christian Stahel, zhaw, IEFE Institut für Energiesysteme und Fluid- Engineering, Winterthur
Lukas Wick, zhaw, IEFE Institut für Energiesysteme und Fluid- Engineering, Winterthur
Frank Tillenkamp, zhaw, IEFE Institut für Energiesysteme und Fluid- Engineering, Winterthur

Diese Studie wurde im Auftrag von EnergieSchweiz erstellt.
Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.

Impressum

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften
School of Engineering
IEFE Institut für Energiesysteme und Fluid- Engineering
Technikumstrasse 9
CH-8401 Winterthur

www.zhaw.ch/iefe
info.iefe@zhaw.ch

DOI: 10.21256/zhaw-2533

Alle Rechte vorbehalten
© Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Winterthur, 2022
IEFE ist ein Institut der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften

Experten

Die Untersuchungen und Ergebnisse in diesem Bericht wurden durch folgende Experten unterstützt:

- Claudio Müller CTA AG
- Jonas Schönenberger Frigo Consulting AG
- Matthias Brügger Leplan AG
- Michael Kriegers Meierhans + Partner AG
- Rolf Löhrer Scheco AG

Danksagung

Der Dank für die wertvolle Unterstützung geht an die mitwirkenden Experten Claudio Müller, Jonas Schönenberger, Matthias Brügger, Michael Kriegers und Rolf Löhrer. Zudem möchten wir uns bei den Initianten und Förderer dieser Untersuchung, Martin Stettler (BFE) und Robert Dumortier, sowie unserem Projektpartner Thomas Lang (zweiweg GmbH) für das entgegengebrachte Vertrauen und die konstruktive Zusammenarbeit bedanken.

Für weitere fachliche Unterstützung und spannende Diskussionen danken wir Hannes Fritschi (Friotherm AG), Giovanni Gonzato (Frascold S.p.A), Corrado de Gioia-Carabellese (Frascold S.p.A) sowie Uwe Lotzmann (Smardt-OPK Chillers GmbH).

Abstract

In dieser Arbeit wurde das energetische Verhalten unterschiedlicher Verdichterbauarten untersucht sowie eine Bewertungsmethode entwickelt, um diese unter variablen Lastprofilen und Aufstellungsorten zu vergleichen. Die zahlreichen Ergebnisse und Diagramme aus dieser Arbeit ermöglichen dem Leser, den Einfluss der Verdichterbauart auf das Anlagenkonzept abzuschätzen.

Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere das gewünschte Kältemittel sowie die benötigte Kälteleistung die verfügbaren Verdichterbauarten stark einschränken. Zudem konnte gezeigt werden, dass für die Bewertung von Verdichterbauarten deren energetisches Verhalten bei variablen Aussentemperaturen entscheidend ist. Die Unterschiede der Verdichterbauarten konnten mit zahlreichen Verdichterkennfelder, welche im Anhang ersichtlich sind, dargestellt werden.

Die Bewertung der Verdichterbauarten basiert auf mehreren Betriebspunkten, welche gemäss ihrem energetischen Anteil gewichtet werden. Es konnte gezeigt werden, dass sowohl der Aufstellungsort als auch die geplante Nutzung einen grossen Einfluss auf die Gewichtung der Betriebspunkte hat. Im Anhang sind die Gewichtungsfaktoren für mehrere Schweizer Städte mit unterschiedlichen Lastprofilen ersichtlich.

Die zahlreichen Verdichterkennfelder, Standorte und Lastprofilen führen zu einer sehr grossen Anzahl möglicher Kombinationen. Für die effiziente Beurteilung einer geplanten Anlage wurde ein Verdichter-Tool entwickelt, welches anhand weniger Parameter die Verdichterbauarten vergleicht und durch weitere Zusatzinformationen bei der Wahl der optimalen Verdichterbauart unterstützt.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis I
Abkürzungsverzeichnis II
Symbolverzeichnis III
Einleitung IV

1. Grundlagen 1
1.1. Kältemaschine 1
1.2. Verdichter 2
1.3. Kreisprozess 12
1.4. Kennzahlen 16
1.5. Betriebsverhalten 19

2. Datenerhebung 30
2.1. Wetterdaten 30
2.2. Verdichterdaten 31

3. Energetische Bewertung - aCOP 34
3.1. Betriebsbedingungen 35
3.2. Betriebspunkte 36
3.3. Gewichtungsfaktor 41
3.4. Taktungsfaktor 42

4. Resultate 43
4.1. Verdichterkennfelder – Konzeptionelle Überlegungen 44
4.2. Verdichterkennfelder – Vergleich Verdichtungsprinzipien 45
4.3. Verdichterkennfelder – Vergleich Verdichterbauarten 46
4.4. Verdichterkennfelder – Vergleich Baugrössen 47
4.5. Verdichterkennfelder – Vergleich Kältemittel 48
4.6. Auswertung Gewichtungsfaktoren 49

5. Literatur 51

A. Anhang – Vergleich Verdichterkennfelder 52
A.1 Vergleich Verdichterbauarten 52
A.2 Vergleich Kältemittel 64
A.3 Vergleich Baugrössen 74

B. Anhang – Gewichtungsfaktoren 86
B.1 Gewichtungsfaktoren Standorte und Lastprofile 86
B.2 Gewichtungsfaktoren Standorte 103
B.3 Gewichtungsfaktoren Lastprofile 106

C. Anhang - Wetterdaten 108
C.1 Stundenhäufigkeit Umgebungstemperatur Standorte 108
C.2 Kumulierte Stundenhäufigkeit Standorte 112

D. Anhang - Verdichterkennfelder 116
D.1 Verdichterkennfelder Klimakälte 116
D.2 Verdichter-Kennfelder Pluskühlung 133
D.3 Verdichter-Kennfelder Minuskühlung 145

Abkürzungsverzeichnis

aCOP	Annual Coefficient of Performance
BFE	Bundesamt für Energie
COP	Coefficient of Performance
IDAweb	Datenportal vom Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz
IEFE	Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering
KM	Kältemittel
PK	Pluskühlung
TK	Tiefkühlung
UH	Überhitzung
UK	Unterkühlung
ZHAW	Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften

Symbolverzeichnis

c_i	Taktungsfaktor Verdichter	-
f	Frequenz	Hz
h	spezifische Enthalpie	J/kg
T_0	Verdampfungstemperatur	°C
T_1	Verdichtereintrittstemperatur	°C
T_2	Heissgastemperatur (Verdichteraustrittstemperatur)	°C
T_C	Verflüssigungstemperatur	°C
T_{gka}	Gaskühleraustrittstemperatur	°C
$\dot{m}$	Massenstrom	kg/s
p_0	Verdampfungsdruck	bar
p_C	Verflüssigungsdruck	bar
p_{gk}	Gaskühlerdruck	bar
P_{el}	Leistungsaufnahme des Verdichters	kW
$\dot{Q}_0$	Kälteleistung	kW
S	Entropie	J/K
$\dot{V}$	Volumenstrom	m^3/s
v_s	Spezifisches Volumen	m^3/kg
ε_C	Carnot Leistungszahl	-
η_C	Carnot Wirkungsgrad	-
η_{en}	Energetischer Wirkungsgrad	-
η_i	Isentroper Gütegrad	-
η_{is}	Isentroper Verdichterwirkungsgrad	-
λ	Liefergrad	-
ρ	Dichte	kg/m^3
w_i	Gewichtungsfaktor	-
f_V	Minderungsfaktor	-

Einleitung

Die Arbeit richtet sich an alle, die mit dem Thema Kältetechnik in Kontakt kommen oder sich dafür interessieren. Der Verdichter ist das Herz der Kältemaschine und deshalb sowohl für Betreiber als auch Planerinnen und Planer von Kältemaschinen und -Anlagen sowie in der Gebäudeautomation von Interesse. Das Ziel der Untersuchung ist es, die Unterschiede der Verdichterbauarten aufzuzeigen. Hierzu wurde ein Verdichter-Tool erstellt, welches die verschiedenen Verdichterbauarten je nach Nutzung und Standort energetisch bewertet. Das Verdichter-Tool [9] kann auf der BFE-Webseite kostenlos heruntergeladen werden.

Die Wahl der optimalen Verdichterbauart ist eine Life-Cycle Betrachtung mit verschiedenen Einflussfaktoren, welche je nach Kunde und Anwendung unterschiedlich gewichtet werden müssen. Dabei spielen insbesondere Betriebs- und Investitionskosten, ökologische Betrachtungen, Sicherheitsanfoderungen und Normen aber auch Schallleistung und Platzbedarf eine wichtige Rolle. Der Schwerpunkt dieser Untersuchung liegt auf der Effizienz, welche ein wichtiger Bestandteil der Betriebskosten ist. Die Untersuchung und Resultate beziehen sich auf einen einzelnen Verdichter.

Im Verdichter Tool wird die Kältemaschine, der Aufstellungsort sowie die geplante Nutzung der Anlage beschrieben. Anschliessend wird mittels einer in dieser Untersuchung erarbeiteten Bewertungsmethode ein Ranking der verfügbaren Verdichterbauarten erstellt.

Der vorliegende Grundlagenbericht beschreibt die konstruktiven Unterschiede der Verdichterbauarten sowie deren Einfluss auf das Verhalten der Verdichter bei unterschiedlichen Betriebspunkten. Die energetische Bewertung der Bauarten basiert auf den hergeleiteten Verdichterkennfelder sowie einer neu definierten Kennzahl. Beides wird im Grundlagenbericht detailliert beschrieben. Das Ziel des Grundlagenberichts ist es, Hintergrundwissen zur Datengrundlage und Bewertungsmethode zu vermitteln.

1. Grundlagen

1.1. Kältemaschine

Der Begriff Kälte steht für den Wärmefluss, der einem Raum entzogen wird. Wärme fliesst immer von einer höheren zu einer tieferen Temperatur, daher wird für die Kühlung eines Raums ein System mit einer tieferen Temperatur benötigt, welches die Wärme des Raums aufnehmen kann [1].

Zur Erzeugung von Kälte gibt es eine Reihe von Techniken, welche jeweils unterschiedliche physikalische Effekte ausnutzen. Am häufigsten verbreitet ist die mechanische Kälteerzeugung, diese kann mittels eines links laufenden Kreisprozesses technisch umgesetzt werden. Eine Kältemaschine besteht aus vier Hauptkomponenten, welche mit Rohrleitungen verbunden sind und einen geschlossenen Kreislauf für das Kältemittel bilden. Eine mögliche anlagentechnische Umsetzung ist in Abbildung 1 dargestellt.

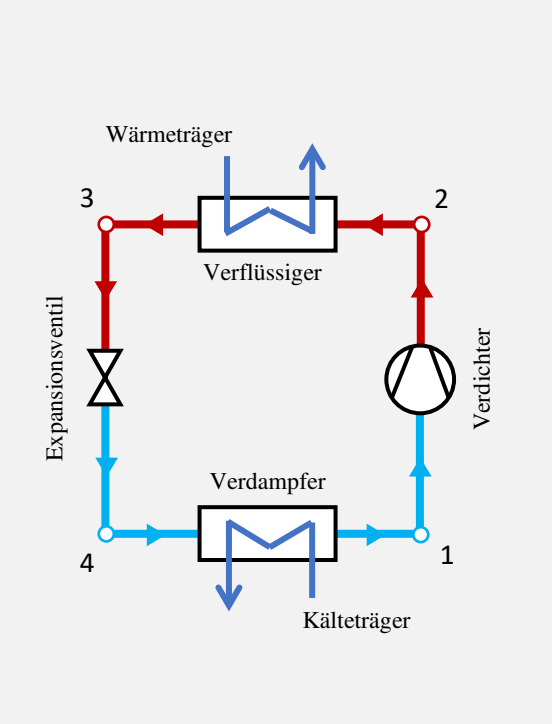


Abbildung 1 *- Aufbau Kältemaschine [2]*

1 → 2: Verdichter
Der Verdichter saugt den im Verdampfer entstehenden Kältemitteldampf ab und verdichtet ihn auf Verflüssigungsdruck

2 → 3: Verflüssiger / Kondensator
Im Kondensator wird die im Verdampfer aufgenommene Wärme sowie das Wärmeäquivalent der Verdichtungsarbeit an eine Wärmesenke abgegeben

3 → 4: Expansionsventil
Das Expansionsventil ist ein Drosselorgan und entspannt das flüssige Kältemittel auf Verdampfungsdruck

4 → 1: Verdampfer
Im Verdampfer nimmt das Arbeitsmedium Wärme von der Kühlstelle oder dem Kälteträger auf und verdampft

Der Verdichter ist das Herzstück einer mechanischen Kompressionskälteanlage und macht ca. 80% dessen Gesamtstromverbrauchs aus. Der Wirkungsgrad eines Verdichters hat somit einen entscheidenden Einfluss auf die Gesamteffizienz einer Kälteanlage. In dieser Untersuchung werden die Unterschiede verschiedener Verdichterbauarten aufgezeigt und deren Einfluss auf die Effizienz untersucht. Dabei werden die Abhängigkeiten zu den anderen Komponenten aufgezeigt, der Schwerpunkt der Untersuchung liegt jedoch auf dem Verdichter.

1.2. Verdichter

Verdichterbauarten

Der Verdichter hat die Aufgabe, das aus dem Verdampfer angesaugte Kältemittelgas auf den Druck, der zur Verflüssigung notwendig ist, zu komprimieren. Hierzu können verschiedene Bauarten eingesetzt werden, die in Abbildung 2 dargestellt sind.

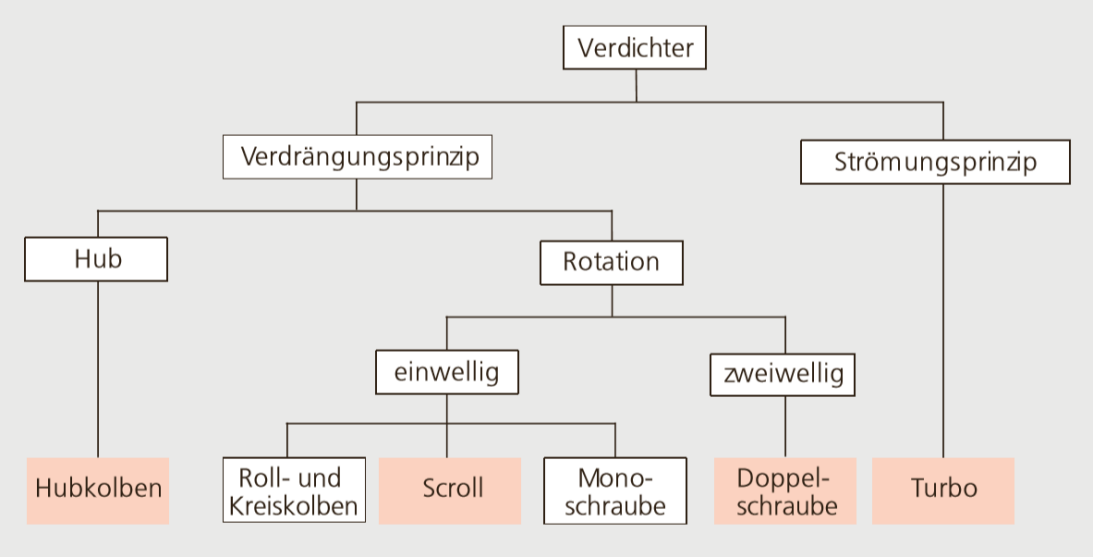


***Abbildung 2** - Übersicht Verdichterbauarten [2]*

Bei den Bauarten wird primär zwischen zwei Verdichtungsprinzipien unterschieden:

- In Verdrängungsverdichtern wird das Kältemittel in einem abgeschlossenen Raum durch Reduktion des Volumens verdichtet [4]. Es kann weiter unterschieden werden, ob der abgeschlossene Raum durch eine lineare oder rotierende Bewegung reduziert wird.

- In Strömungsmaschinen wird das Kältemittelgas auf eine hohe Geschwindigkeit beschleunigt, wodurch sich seine kinetische Energie erhöht. Im Diffusor wird die Bewegungsenergie anschliessend in statischen Druck umgewandelt [2].

Je nach Kälteanwendung, benötigter Kälteleistung oder Betriebsregime stehen dabei verschiedene Verdichterbauarten zur Auswahl. Die einzelnen Bauarten haben, bedingt durch die Konstruktion, ein charakteristisches energetisches Verhalten. Durch die Wahl der optimalen Verdichterbauart können die Betriebs- bzw. Lebenszykluskosten minimiert werden, was sowohl aus ökonomischer als auch ökologischer Sicht anzustreben ist.

Hubkolben

Ein Hubkolbenverdichter besteht typischerweise aus mehreren Zylindern, in welchen das Kältemittel durch einen Hub des Kolbens verdichtet wird. Dieses Verdichtungsprinzip ist universell einsetzbar und ist deshalb sehr verbreitet. Hubkolbenverdichter eignen sich für die Überwindung von grossen Druckdifferenzen, wie sie zum Beispiel im Anwendungsfall der Wärmenutzung entstehen [2].

Besonders charakteristisch für das Verhalten von Hubkolbenverdichter sind die druckabhängigen Arbeitsventile, die das zyklische Ansaugen und Ausstossen des Kältemittels sicherstellen. Durch den zyklischen Verdichtungsprozess entsteht ein pulsierender Massenstrom in der Gesamtanlage. Die Arbeitsventile sind empfindlich gegenüber Flüssigkeitsschlägen [7]. Deshalb muss durch Überhitzung des Kältemittels sichergestellt werden, dass der Verdichter nur gasförmiges Kältemittel ansaugt. Hubkolbenverdichter sind nicht besonders laut, erzeugen jedoch ein unangenehmes Hämmern. Dieser Schall ist schwierig zu dämmen.

Zwischen Zylinderkopf und oberem Totpunkt des Kolbens entsteht ein Schadraum, da die beiden Flächen im Betrieb nicht aufeinanderschlagen dürfen. Das im Schadraum befindliche Kältemittel wird trotz eines geöffneten Auslassventils durch den Kolben nicht ausgestossen und befindet sich daher auf Verflüssigungsdruck. Nach dem Schliessen des Auslassventils erhöht sich durch die anschliessende Abwärtsbewegung des Kolbens das Zylindervolumen wieder und der Druck im Zylinder reduziert sich, bis der Saug- bzw. Verdampfungsdruck erreicht ist. Das Saugventil öffnet sich und der Zylinder füllt sich mit Kältemittelgas. Dies ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt. Je grösser die Differenz zwischen Verdampfungs- und Verflüssigungsdruck ist, desto mehr Abwärtsbewegung (Hub oder Kolbenweg) ist nötig, bevor das Saugventil öffnet. Diese Rückexpansion hat einen grossen Einfluss auf den Verlauf des sogenannten Liefergrads von Kolbenverdichtern.

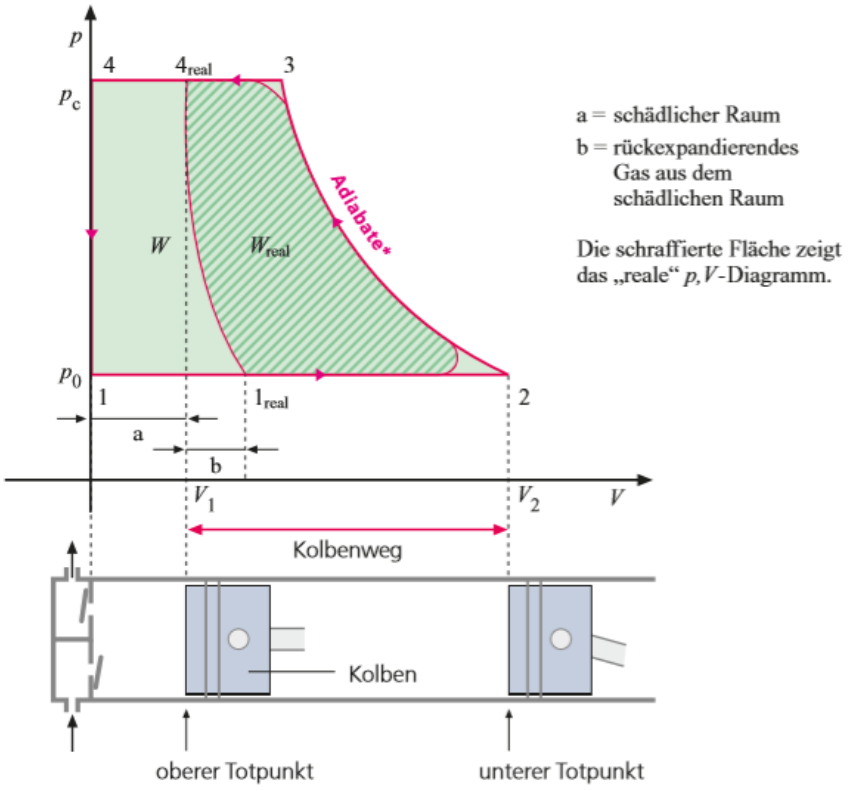


***Abbildung 3** - Verdichtungsvorgang Hubkolbenverdichter [4]*

Scrollverdichter

Der Scroll ist ein Rotationsverdichter, welcher überwiegend in kleinen bis mittleren Leistungsklassen verwendet wird. Er besteht aus einer fixen und einer orbitierenden Evolventenspirale (Scroll), welche eine Reihe sichelförmiger Gastaschen bilden [7]. Beim Verdichtungsvorgang werden die Gastaschen von aussen nach innen verschoben, wobei sich das Volumen reduziert und das Kältemittel verdichtet wird. Dies ist in Abbildung 4 schematisch dargestellt. Das Verhältnis von Eintritts- zu Austrittsvolumen bleibt jedoch konstant. Ein Scroll hat deshalb ein konstantes Druckverhältnis. Weicht der Betriebspunkt vom Druckverhältnis ab, wird das Kältemittel entweder unter- oder überverdichtet, was sich negativ auf die Effizienz auswirkt. Insbesondere bei geringen bis mittleren Druckverhältnissen werden hohe Leistungszahlen erreicht [7]. Dieses Verdichtungsprinzip ist für den Einsatz von Economiser geeignet, wodurch die Effizienz der Anlage verbessert werden kann. Scrollverdichter sind relativ unempfindlich gegen Flüssigkeitsschläge bzw. Nassbetrieb und sehr vibrations- und geräuscharm.

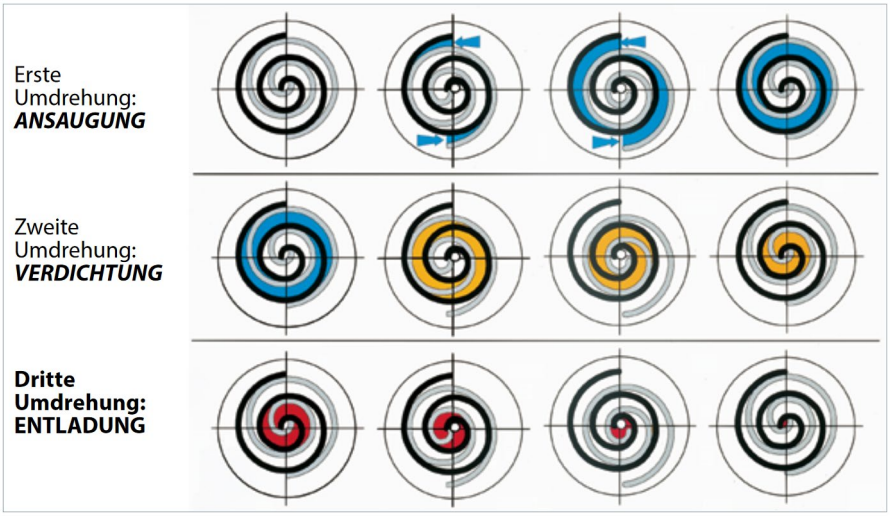


***Abbildung 4** - Verdichtungsvorgang Scrollverdichter [Danfoss.com]*

Roll- und Kreiskolben

Der Rollkolben ist ein Rotationsverdichter, dieser wird überwiegend in kleinen Leistungsklassen verwendet. Er verfügt über einen exzentrisch gelagerten Kolben, welcher in einem Zylinder rotiert. Ein im Gehäuse gelagerter Trennschieber wird durch eine Feder an den Kolben gedrückt und unterteilt den Verdichtungsraum in einen Ansaug- und einen Verdichtungsraum. Dies ist in Abbildung 5 schematisch dargestellt. Rollkolbenverdichter sind empfindlich gegen Flüssigkeitsschläge. Sie eignen sich sehr gut für eine Leistungsregelung mittels Frequenzumrichter [7].

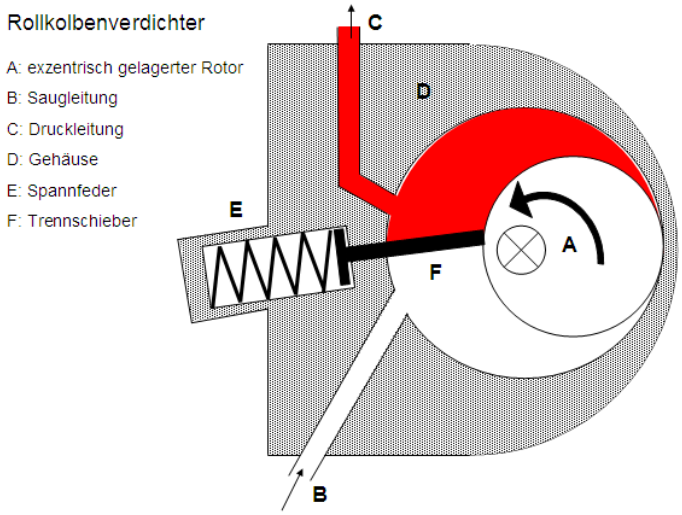


***Abbildung 5** - Verdichtungsvorgang Rollkolben [Wikipedia]*

Schraubenverdichter

Der Schraubenverdichter ist ein Rotationsverdichter, der überwiegend in grösseren Leistungsklassen verwendet wird. Er verfügt über einen einfachen Aufbau mit zwei parallel angeordneten gegenläufigen Rotoren, welche in einem Gehäuse angeordnet sind. Das Volumen zwischen den Schraubenflanken wird in Förderrichtung stetig reduziert, wodurch das Kältemittel verdichtet wird. Dies ist in Abbildung 6 schematisch dargestellt. Dieses Verdichtungsprinzip ist für den Einsatz von Economiser geeignet, wodurch die Effizienz der Anlage verbessert werden kann. Ausserdem sind Schraubenverdichter sehr kompakt und unempfindlich gegenüber Nassbetrieb (Überfluteter Verdampfer) [7]. Der ungeregelte Schraubenverdichter arbeitet wie der Scroll mit einem konstanten Druckverhältnis. Dies kann jedoch durch eine Schieber-Regelung, welche oft in Kombination mit einer Drehzahlregelung verwendet wird, angepasst werden. Dies wird in Kapitel «Leistungsregelung» genauer beschrieben.

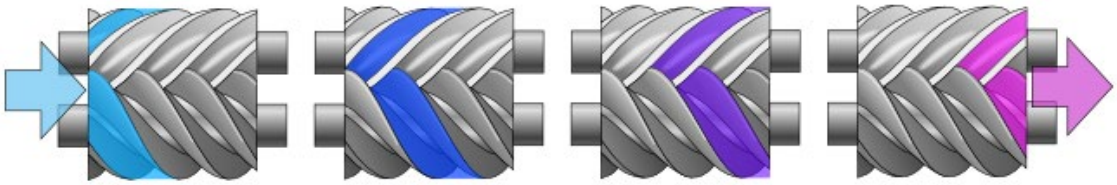


***Abbildung 6** - Verdichtungsvorgang Schraube [www.kompressor.one]*

Turboverdichter

Der Turboverdichter wird zu den Strömungsmaschinen gezählt und ist für grosse bis sehr grosse Leistungen erhältlich. Im Turboverdichter wird das Kältemittel bei sehr grossen Rotationsgeschwindigkeiten mit bis zu 30'000 Umdrehungen pro Minute auf eine hohe Geschwindigkeit beschleunigt. Im Diffusor wird die kinetische Energie in einen statischen Druck umgewandelt. Dies ist in Abbildung 7 schematisch dargestellt. Deshalb ist die Druckdifferenz abhängig von der Drehzahl. Eine Wärmenutzung ist nur beschränkt möglich. Die Charakteristik eines Turbo-Verdichters ist vergleichbar mit der einer Pumpe und ist im Anhang von «Klimakälte heute» [2] sehr detailliert beschrieben. Dieses Verdichtungsprinzip ist für den Einsatz von Economiser geeignet, wodurch die Effizienz der Anlage verbessert werden kann. Ausserdem sind Turboverdichter sehr kompakt und haben einen ruhigen lauf. Ein grosser Vorteil der Turboverdichter ist, dass diese ölfrei realisiert werden können, da kein wesentlicher Flächenkontakt zwischen Rotor und Gehäuse stattfindet, der geschmiert werden muss. Dies führt zu weniger Fouling in den Wärmetauschern, was sich positiv auf die Effizienz auswirkt. Turboverdichter erreichen insbesondere im Teillastbetrieb hervorragende Leistungszahlen. Die Kombination mit Freecooling ist nur bedingt sinnvoll. Aufgrund der hohen Rotationsgeschwindigkeiten sind aufwändige Ein- und Ausschaltroutinen nötig. Diese haben einen sehr starken Einfluss auf die Effizienz des Verdichters. Bei Einsatz von Turboverdichter ist deshalb darauf zu achten, dass häufiges Ein- und Ausschalten zwingend vermieden wird. In dieser Untersuchung werden lediglich stationäre Arbeitspunkte untersucht, der Einfluss der Routinen ist daher nicht berücksichtigt.

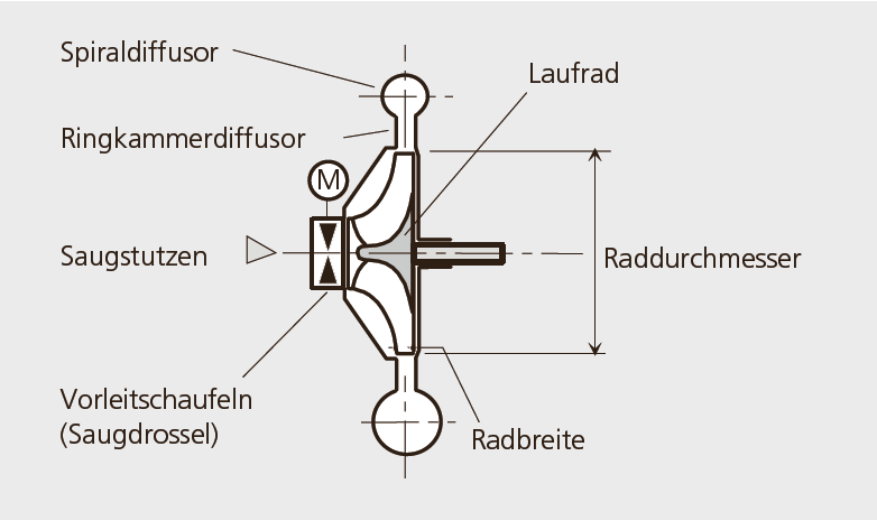


***Abbildung 7** - Verdichtungsvorgang Turbo [2]*

Antriebe

Als Antrieb für Kälteverdichter kommen Drehstrom-Asynchronmotoren oder Permanentmagnet-Motoren zum Einsatz. Der Hauptvorteil eines Permanentmagnet-Motors liegt darin, dass im Rotor keine Ströme fliessen und somit keine Verluste entstehen. Der Permanentmagnet-Motor ist etwas teurer, hat jedoch eine höhere Effizienz und geringere Baugrösse. Für beide Antriebe sind Drehzahlregelungen mittels Frequenzumrichter möglich.

Neben der Art des Motors ist seine Anordnung im Zusammenhang mit dem Verdichter-Gehäuse wichtig. Hier wird zwischen drei Bauarten unterschieden, welche in Abbildung 8 zusammengefasst sind.

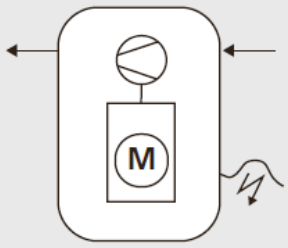
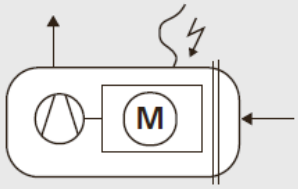
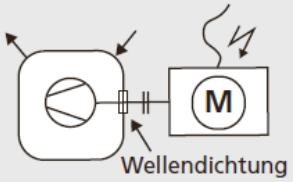
Vollhermetischer Verdichter	Halbhermetischer Verdichter	Offener Verdichter
Bei vollhermetischen Maschinen bilden der Verdichter und der Elektromotor eine in sich geschlossene Einheit (dicht verschweisst). • Kein Kältemittelverlust • Motorkühlung durch Kältemittel, Anhebung der Verdampfungstemperatur nur begrenzt möglich • Kleiner Motor, da direktgekühlt • Kleine Einheiten, nicht reparierbar • Leistungsbereich hermetischer Verdichter: bis ca. 100 kW.	Bei halbhermetischen Maschinen sind der Verdichter und Motor zusammengebaut und zugänglich. Dadurch wird eine Reparatur möglich. • Kein Kältemittelverlust • Motorkühlung durch Kältemittel, die Abwärme wird direkt mit dem Kältemittel abgeführt • Hoher Motorwirkungsgrad, kleiner Motor, Anhebung der Verdampfungstemperatur nur begrenzt möglich • Kleinere bis mittelgrosse Einheiten • Eventuell hohe Kosten bei einem Motorschaden • Leistungsbereich halbhermetischer Verdichter: ca. 50 kW bis 500 kW	Bei offenen Maschinen sind der Verdichter und Motor voneinander getrennt. Dieses System wird vor allem bei höheren Leistungen und bei Ammoniakanwendungen eingesetzt. (NH_3 würde die Kupferwicklungen angreifen). • Gefahr der Kältemittelverluste durch die Stopfbüchse des Kompressors • Diverse Antriebe einsetzbar • Motor gibt die Wärme an die Umgebung ab • Reparierbar • Gut geeignet für Industriekälte-Anwendungen
		
Bild 5.11: *Vollhermetischer Verdichter.*	*Bild 5.12:* *Halbhermetischer Verdichter.*	*Bild 5.13:* *Offener Verdichter.*

***Abbildung 8** - Verdichter-Ausführungen – Motor [2]*

Leistungsregelung

Die erzeugte Kälteleistung des Verdichters ist stark Betriebspunktabhängig und häufig gegenläufig zum Bedarf. Dies wird im Kapitel «2.5 Betriebsverhalten» genauer beschrieben. Um die Kälteleistung des Verdichters dem Kältebedarf anzupassen, gibt es mehrere Möglichkeiten.

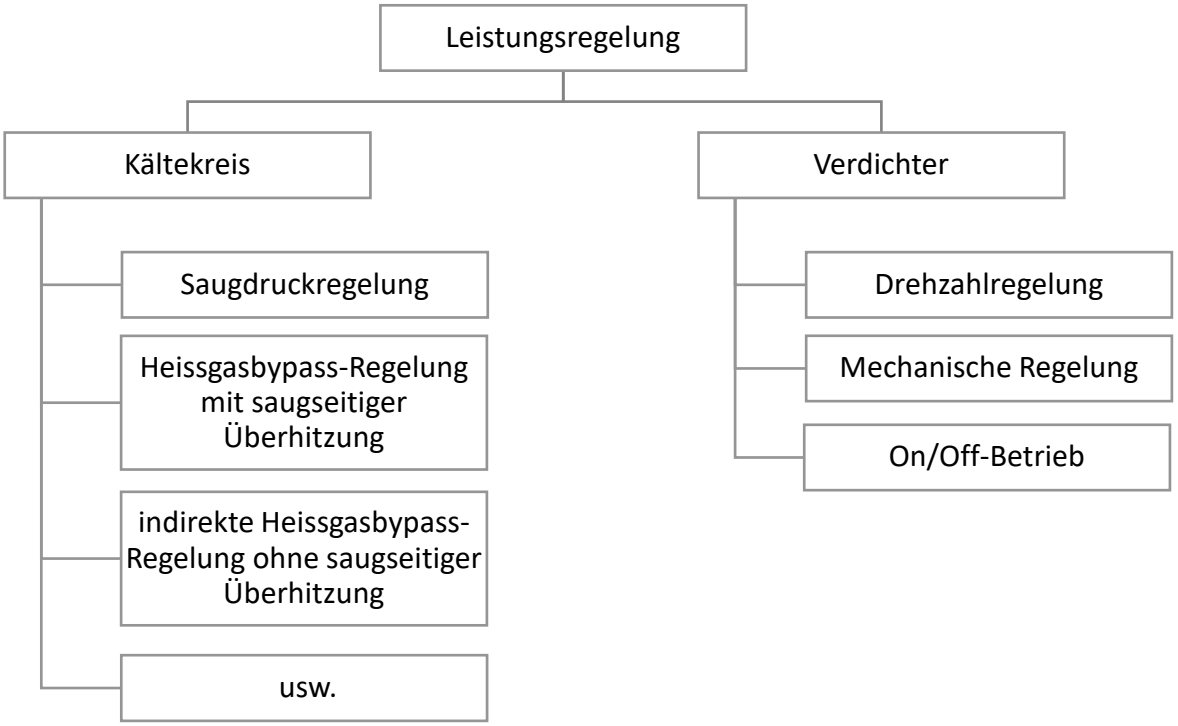


Abbildung 9 *- Möglichkeiten der Leistungsregelung*

In Abbildung 9 sind die verschiedenen Möglichkeiten zur Regulierung der Kälteleistung aufgezeigt. Diese lassen sich in zwei Gruppen einteilen. Bei Leistungsregelungen mittels Kältekreis wird die Kälteleistung reduziert, ohne das am Verdichter die Leistungsaufnahme reduziert wird. Diese Leistungsregelungen sind daher sehr ineffizient und veraltet. Deutlich bessere Lösungen können beim Verdichter realisiert werden. Bei Leistungsregelungen mittels Verdichter wird der geförderte Massenstrom verändert. Dabei ändert sich sowohl die Kälteleistung als auch die Leistungsaufnahme des Verdichters. Dabei ist zu beachten, dass die Ölrückführung zum Verdichter auch bei kleinen Durchflüssen sichergestellt werden muss. Der Massenstrom kann daher nicht beliebig reduziert werden. Zudem müssen Wärmeübertrager und Regelventile für die unterschiedlichen Kältemitteldurchsätze (Leistungen) ausgelegt sein. Insbesondere die mechanischen Leistungsregelungen können sich je nach Hersteller deutlich unterscheiden. Damit die Verdichter Herstellerneutral verglichen werden können, beschränkt sich diese Untersuchung auf die Leistungsregelung mittels variabler Drehzahl.

Drehzahlregelung

Diese Leistungsregelung ist für alle Verdichterbauarten verfügbar. Mittels Frequenzumrichter (FU) bzw. Inverter wird die Drehzahl des Motors verändert. Dabei können Massenstrom bzw. Kälteleistung stufenlos angepasst werden. Bei Strömungsverdichtern ist der Austrittsdruck des Verdichters ebenfalls an die Drehzahl gekoppelt. Sie benötigen zudem eine Mindestdrehzahl, damit sich die Strömung stabil aufbauen kann. Der Frequenzbereich kann je nach Hersteller unterschiedlich sein. Beim Einsatz einer Drehzahlregulierung müssen die kritischen Frequenzen beachtet werden, bei denen die Kältemaschine aufgrund von Eigenfrequenzen beschädigt werden könnte. Zudem müssen elektrische Filter oder Drosseln eingesetzt werden, um das Stromnetz vor Oberwellen zu schützen. Die Drehzahlregulierung ist sehr weit verbreitet und eine effiziente Methode zur Leistungsregulierung. Zu beachten ist jedoch, dass die FU-Verluste frequenzabhängig sind.

Mechanische Regelung – Zylinderabschaltung

Diese Leistungsregelung ist lediglich bei Hubkolbenverdichter verfügbar. Bei dieser Regelung werden einzelne Zylinder durch Absperren ihres Saugkanals inaktiv – er läuft einfach ohne Kompression mit. Dabei reduziert sich der geförderte Kältemittelmassenstrom und die Kälteleistung nimmt ab. Die Leistungsregelung erfolgt in Stufen, welche abhängig von der Anzahl Zylinder ist. Mechanische Verluste des inaktiven Zylinders bleiben jedoch bestehen. Die Zylinderabschaltung kann auch mit einer Drehzahlregelung kombiniert werden, wodurch der Regelbereich des Verdichters vergrössert werden kann. Diese Regelung ist simpel aber nur mässig effizient [2].

Mechanische Regelung - Digital-Scroll

Diese Leistungsregelung ist lediglich bei Scroll-Verdichter umsetzbar. Bei dieser Regelung wird der Kältemittelmassenstrom durch kurze Unterbrechungen der Drehbewegung, also des Verdichtungsvorgangs, reduziert. Hierzu werden die Scroll-Spiralen für einen kurzen Zeitraum axial entkoppelt. Die Leistungsregelung mit Digital-Scroll ist stufenlos möglich. Aufgrund der mechanischen Verluste ist diese Regelungsart nicht sehr effizient und verursacht Druck-schwankungen auf der Druckseite [2].

Mechanische Regelung – Saugdrosselregelung

Diese Leistungsregelung wird lediglich bei Turbo-Verdichtern in Kombination mit einer Drehzahlregelung eingesetzt. Zur Reduktion des Massenstroms wird mit einer Vorleitschaufel die Anströmrichtung und damit auch die resultierende Gasgeschwindigkeit geändert. Der Wirkungsgrad des Verdichters geht dabei stetig zurück.

Mechanische Regelung - Schieber-/Bypass-Regelung

Wie in Kapitel «Schraubenverdichter» bereits beschrieben, wird das Volumen zwischen den Schraubenflanken in Förderrichtung stetig reduziert. Mittels Schieber- oder Bypass-Regelung wird die wirksame Verdichtungslänge angepasst, indem das Kältemittel erst später dem Verdichtungsvorgang zugeführt wird. Dabei werden sowohl der Massenstrom als auch das Druckverhältnis reduziert. Die Schieber Regelung erreicht im Leistungsbereich von 50-100 % eine gute Energieeffizienz. Wird die Leistung weiter reduziert, nimmt die Effizienz deutlich ab [2]. Die Bypass-Regelung ist weniger effizient und wird heute nicht mehr verwendet. Beide Regelungen können mit einer Drehzahlregelung kombiniert werden.

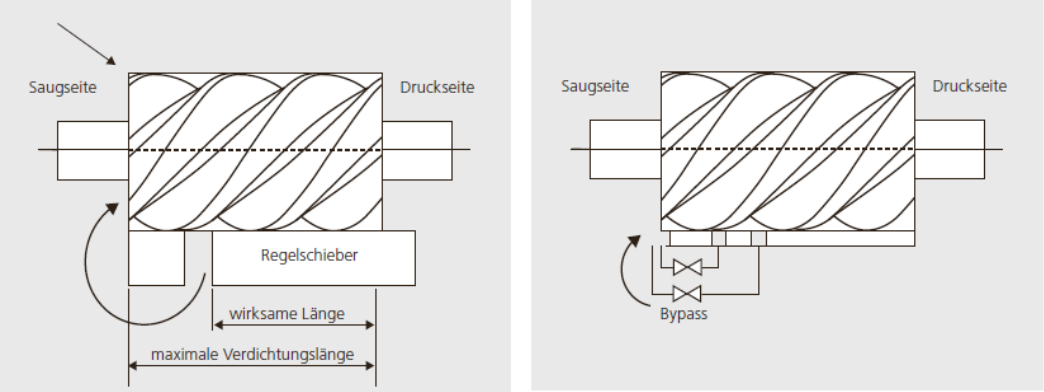


***Abbildung 10** - Schieber- und Bypass-Regelung [2]*

On/Off-Betrieb – Parallelverbund

Diese Leistungsregelung wird bei allen Verdichterbauarten angewendet und ist eine effiziente Methode zur Leistungsregulierung. Der Gesamtmassenstrom der Kältemaschine wird auf mehrere parallel angeordneten Verdichter aufgeteilt. Übersteigt der Kältebedarf die Kälteleistung des Verdichters, wird ein weiterer Verdichter dazugeschaltet. Wird einer der Verdichter mit einer zusätzliche Leistungsregelung ausgestattet, kann die Kälteleistung stufenlos angepasst werden. Ansonsten erfolgt die Leistungsregelung in Stufen. Bei einem Ausfall einer der Verdichter ist ein reduzierter Betrieb weiterhin möglich. In dieser Untersuchung werden lediglich einzelne Verdichter und keine Verbundschaltungen untersucht. Anhand der Verdichterkennfelder kleinerer Verdichter kann die Effizienz im Parallelverbund jedoch abgeschätzt werden.

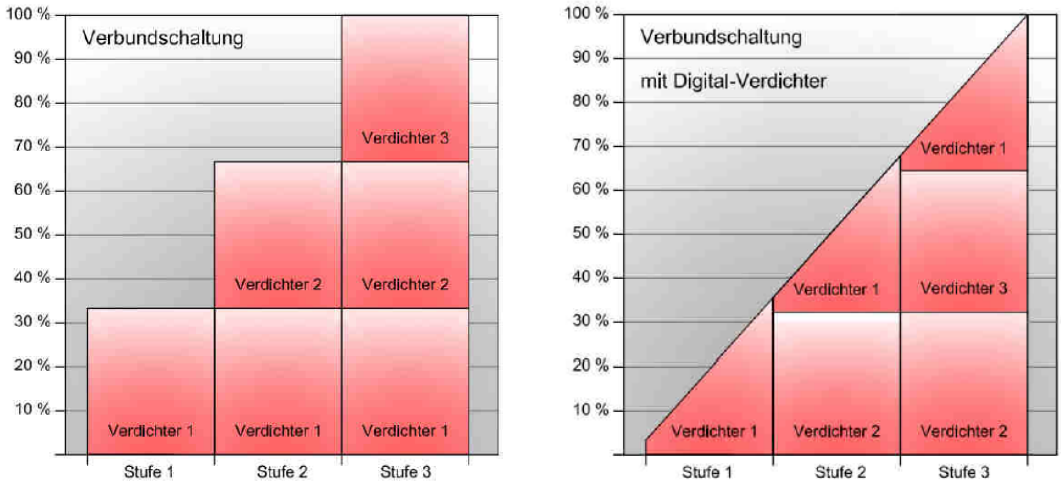


***Abbildung 11** - Parallelverbund mehrerer Verdichter [Rox-Klimatechnik GmbH]*

Einsatzgrenzen

Im Einsatzgrenzen-Diagramm werden die vom Verdichter-Hersteller zugelassenen Verflüssigungs- und Verdampfungstemperaturen angegeben [7]. Die angegebenen Grenzen beziehen sich immer auf eine definierte Sauggastemperatur oder Überhitzung. Wird der Verdichter mit einer höheren Überhitzung betrieben, kann dies die zulässigen Einsatzgrenzen einschränken. Die Einsatzgrenzen der Verdichter können je nach Bauart und Kältemittel unterschiedlich sein. Beim Einsatz einer Leistungsregulierung können weitere Einschränkungen gelten. In Abbildung 12 ist ein typisches Einsatzgrenzen-Diagramm dargestellt.

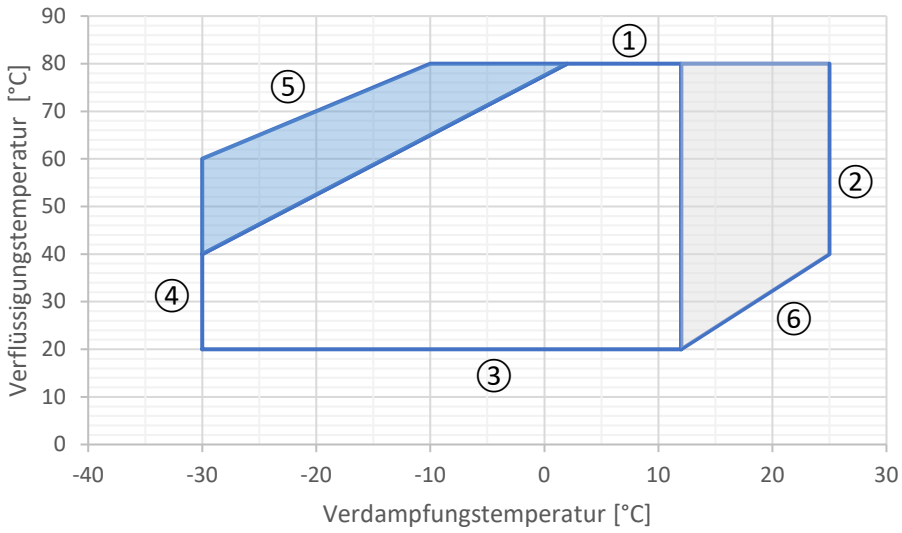


***Abbildung 12** - Einsatzgrenzen-Diagramm Verdichter*

① Die Verflüssigungstemperatur wird durch die **Druckfestigkeit** des Verdichters und die **maximale Stromaufnahme** bzw. dem maximalen Drehmoment des Antriebes begrenzt [3][7].

② Die Verdampfungstemperatur ist durch das **maximale Drehmoment** des Verdichters begrenzt. Durch den Einsatz eines stärkeren Antriebes kann diese Grenze verschoben werden, dies ist mit der grauen Fläche angedeutet.

③ Die minimale Verflüssigungstemperatur wird **gemäss Herstellerangaben** begrenzt.

④ Die minimale Verdampfungstemperatur wird durch die **Siedetemperatur des Kältemittels bei Atmosphärendruck** limitiert. Für einen sicheren Betrieb darf der Verdampfungsdruck nicht unter Atmosphärendruck liegen, damit bei Undichtheiten auf der Saugseite keine Umgebungsluft und somit Feuchte in den Kältekreis eindringen kann. Zur Kühlung des Antriebes muss ein minimaler Kältemittelmassenstrom gewährleistet werden [8].

⑤ Diese Grenze wird durch die **maximal zulässige Austrittstemperatur** des Verdichters definiert. Je nach Kältemittel und Überhitzung kann diese Grenze daher variieren. Sie kann durch zusätzliche Kühlung des Verdichters verschoben werden, dies ist mit der blauen Fläche angedeutet. Die Kühlung hat jedoch Einfluss auf die Effizienz des Verdichters.

⑥ Diese Grenze wird durch die **minimal benötigte Druckdifferenz** über dem Verdichter definiert. Mit dieser Druckdifferenz wird die Schmierung aller Verdichter-Bauteile sichergestellt. Bei Hubkolben-verdichter wird die minimale Druckdifferenz zudem zum Öffnen und Schliessen der Arbeitsventile benötigt [8].

1.3. Kreisprozess

Um die Zustandsänderungen und Energieflüsse im Kältekreis zu veranschaulichen, ist das log p-h Diagramm bestens geeignet. Wird dem System Energie zu- oder abgeführt, verändert sich die Enthalpie, welche auf der x-Achse dargestellt ist. Somit kann im Diagramm direkt die Veränderung der Wärmemenge abgelesen werden.

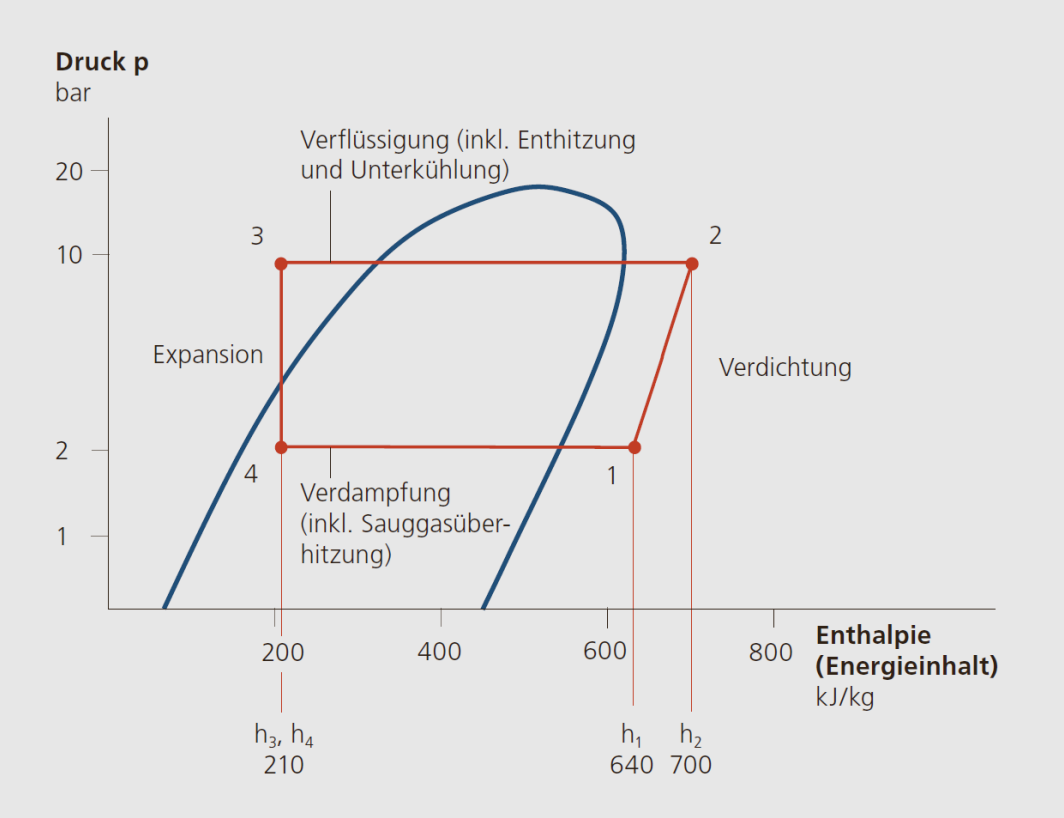


Abbildung 13 *- Kältekreis im log p-h Diagramm [2]*

Der Verdichter saugt den Kältemitteldampf auf Verdampfungsdruck an und verdichtet ihn auf Verflüssigungsdruck. Dabei steigen sowohl der Druck als auch die Temperatur des Kältemittels stark an. Das Kältemittel macht dabei eine Zustandsänderung von 1 nach 2. Dies ist in der Abbildung 13 dargestellt.

Um diese Zustandsänderung zu beschreiben, müssen die Verdichterein- (1) und -austrittsbedingungen (2) bekannt sein. Dafür werden Druck und Temperatur benötigt. Die Verdichtereintrittstemperatur (T_1) ergibt sich aus Verdampfungstemperatur (T_0) und Überhitzung (UH). Der Eintrittsdruck entspricht, wenn Druckverluste vernachlässigt werden, dem Verdampfungsdruck (p_0). Der Zustand am Verdichteraustritt ist definiert durch die Heissgastemperatur (T_2) sowie den Verflüssigungsdruck (p_c) – ebenfalls unter Vernachlässigung von Druckverlusten.

Der Verdichter ist je nach Betriebspunkt unterschiedlich effizient. Der Betriebspunkt ist hierbei durch die Position der Punkte 1 und 2 und zusätzlich durch die Drehzahl des Verdichters gekennzeichnet. Zudem gibt es Unterschiede zwischen den Verdichterbauarten. In dieser Untersuchung werden die bauartspezifischen Unterschiede aufgezeigt.

Verdampfungstemperatur

Die Aufgabe der Kältemaschine ist, eine Kühlstelle mit der benötigten Kälteleistung zu versorgen, um eine dort gewünschte Kühltemperatur zu halten. In einem Supermarkt werden die Lebensmittel z.B. auf 4 °C heruntergekühlt, damit diese weniger schnell verderben. In einem Büro wird die Raumluft im Sommer in Abhängigkeit der Aussentemperatur auf unterhalb von 26.5 °C gekühlt, damit der Aufenthalt für den Menschen behaglich bleibt. Das Temperaturniveau ist somit abhängig von der Kälteanwendung bzw. dem Verbraucher.

Die Temperatur der Kühlstelle hat einen sehr grossen Einfluss auf die Verdampfungstemperatur und somit auch auf die Effizienz der Anlage. Der Zusammenhang zwischen Kühlstellentemperatur und Verdampfungstemperatur ist in Abbildung 14 dargestellt.

Temperaturverlauf Direktverdampfer: **Temperaturverlauf mit Zwischenkreislauf:**

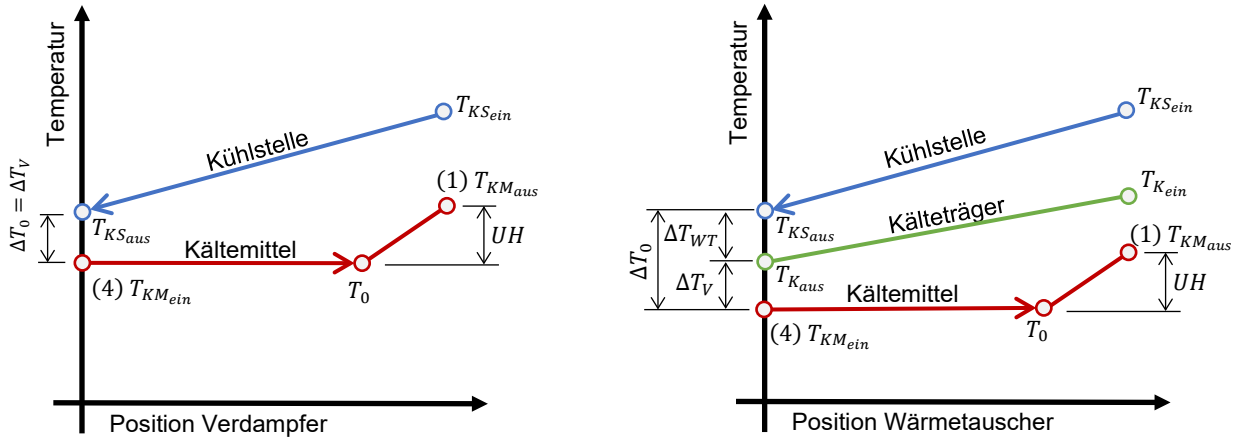


Abbildung 14 *- Temperaturverlauf Verdampfer*

Bei der Wärmeaufnahme können Kälteanlagen in Anlagen mit Direktverdampfung und Anlagen mit Zwischenkreislauf eingeteilt werden. Die Temperaturdifferenz zwischen Kühlstellenaustritt ($T_{KS_{aus}}$) und Verdampfungstemperatur (T_0) wird durch jeden zusätzlichen Zwischenkreis erhöht.

$$Direktverdampfer: \quad T_0 = T_{KS_{aus}} - \Delta T_0 = T_{KS_{aus}} - \Delta T_V \tag{1}$$

$$Zwischenkreis: \quad T_0 = T_{KS_{aus}} - \Delta T_0 = T_{KS_{aus}} - \Delta T_V - \Delta T_{WT} \tag{2}$$

Die Temperatur der Kühlstelle ($T_{KS_{aus}}$) ist bei vielen Anwendungen konstant. Die Temperaturdifferenzen über dem Verdampfer (ΔT_V) und Wärmetauscher (ΔT_{WT}) sind betriebspunktabhängig und werden in Teillast kleiner. In dieser Untersuchung liegt der Fokus auf dem Verdichter, deshalb werden konstante Verdampfungstemperaturen untersucht.

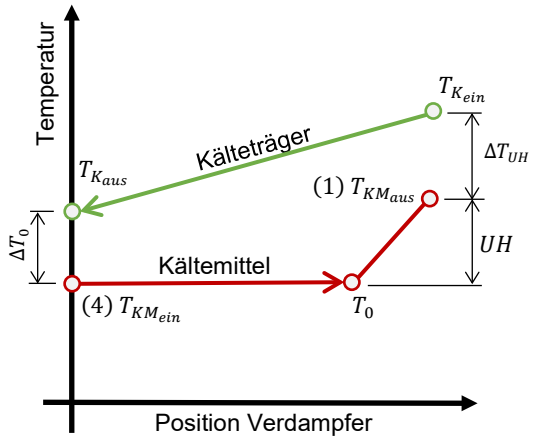
Überhitzung

Die zweite wichtige Eintrittsgrösse in den Verdichter ist die Kältemittelüberhitzung. Durch die Überhitzung wird sichergestellt, dass das Kältemittel vollständig verdampft ist, bevor es in den Verdichter eintritt. Dies ist nötig, damit es im Verdichter nicht zu Flüssigkeitsschlägen kommen kann. Diese beeinflussen die Lebensdauer des Verdichters negativ und sind deshalb zwingend zu vermeiden. Die Überhitzung ist auch wichtig für die Schmierung des Verdichters. Vermischt sich das Öl mit flüssigem Kältemittel, reduziert sich dessen Schmierfähigkeit. Dies erhöht den Verschleiss und reduziert die Lebensdauer des Verdichters [7].

Die Überhitzung ist für den sicheren Betrieb der Kältemaschine nötig, wirkt sich jedoch auf dessen Effizienz aus. Einerseits erhöht sich die Enthalpie-Differenz über dem Verdampfer, gleichzeitig reduziert sich jedoch die Dichte des Kältemittels am Verdichtereintritt (vgl. log p, h – Diagramm). Bei einem volumetrischen Verdichter führt eine geringere Dichte zu einer geringeren Masse im eingeschlossenen Volumen und damit zu einem reduzierten Massenstrom. Zudem erhöht sich die Heissgastemperatur am Verdichteraustritt. Dies kann je nach Betriebspunkt dazu führen, dass eine externe Kühlung notwendig wird.

Ein weiterer wichtiger Punkt, der bei der Überhitzung zu beachten ist, ist der Teillastbetrieb des Verdampfers. Im Teillastbetrieb wird häufig die Temperaturdifferenz des Kälteträgers ($T_{K_{ein}} - T_{K_{aus}}$) reduziert, dessen Austrittstemperatur ($T_{K_{aus}}$) bleibt jedoch konstant. Dies ist in der Abbildung 15 dargestellt.

Temperaturverlauf Volllast:



Temperaturverlauf Teillast:

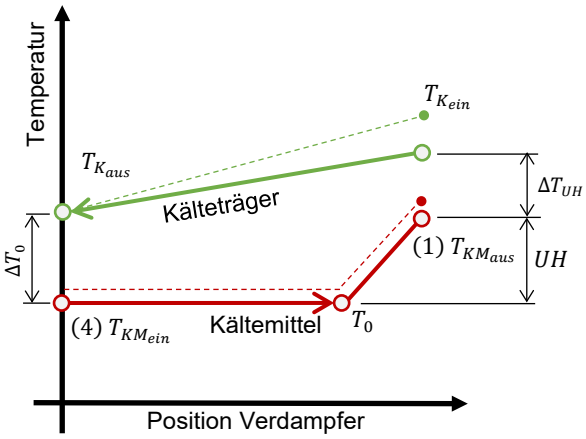


***Abbildung 15** - Temperaturverlauf Volllast und Teillast*

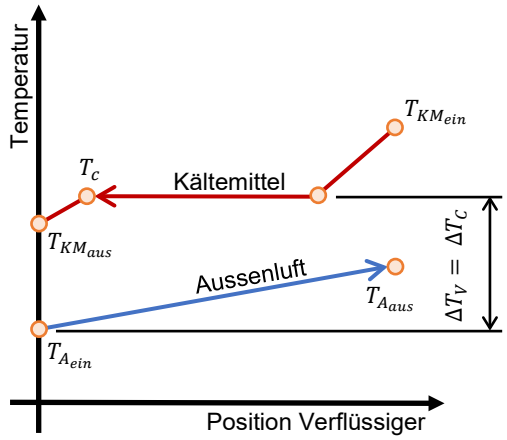
Ist die Überhitzung (UH) deutlich grösser als die Temperaturdifferenz des Kälteträgers ($T_{K_{ein}} - T_{K_{aus}}$), verschiebt sich die kleinste Temperaturdifferenz des Verdampfers von ΔT_0 zu ΔT_{UH}. Wird nun im Teillastbetrieb die Eintrittstemperatur des Kälteträgers ($T_{K_{ein}}$) reduziert, kann dies dazu führen, dass die Verdampfungstemperatur sinkt. Dies führt zu einer erhöhten Leistungsaufnahme im Verdichter und reduziert daher die Effizienz.

Verflüssigungstemperatur

Damit das Arbeitsmedium einen Kreisprozess durchlaufen kann, müssen sowohl die aufgenommene Wärme des Verbrauchers als auch die eingebrachte mechanische Arbeit der Verdichtung an eine Wärmesenke abgegeben werden. Das Kältemittel muss somit auf eine Temperatur oberhalb der Wärmesenkentemperatur verdichtet werden, damit die Wärme zur Wärmesenke fliessen kann.

In dieser Untersuchung werden lediglich luftgekühlte Verflüssiger untersucht. Die Verflüssigungstemperatur ist dabei stark an die Aussentemperatur gekoppelt. Der Zusammenhang zwischen Aussentemperatur und Verflüssigungstemperatur ist in Abbildung 16 dargestellt.

Temperaturverlauf Direktverflüssiger:



Temperaturverlauf mit Zwischenkreislauf:

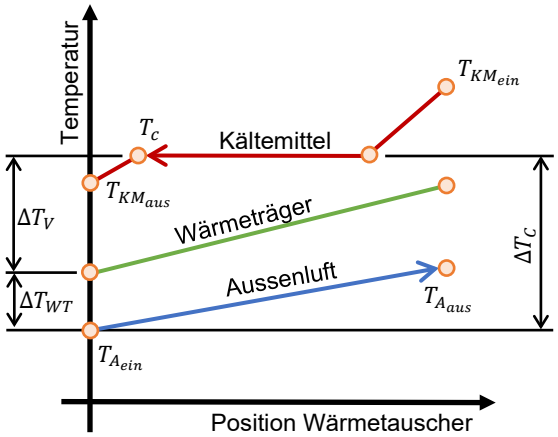


Abbildung 16 *- Temperaturverlauf Verflüssiger*

Zwischen Aussentemperatur und Verflüssigungstemperatur gibt es eine Temperaturdifferenz ΔT_C welche von der Konfiguration der Kältemaschine abhängig ist. Bei einer Kälteanlage mit einem zusätzlichem Wärmeträger, ist die Temperaturdifferenz aufgrund des zusätzlichen Wärmetauschers grösser, als wenn das Kältemittel direkt verflüssigt wird.

$$Direktverflüssiger: \quad T_C = T_A + \Delta T_C = T_A + \Delta T_V \tag{3}$$

$$Zwischenkreis: \quad T_C = T_A + \Delta T_C = T_A + \Delta T_V + \Delta T_{WT} \tag{4}$$

1.4. Kennzahlen

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Kennzahlen von Verdichtern bzw. Kältemaschinen aufgelistet und erläutert. Die Bildung von Kennzahlen erlaubt es, verschiedene Verdichterbauarten untereinander zu vergleichen und so ihre Vor- und Nachteile aufzuzeigen.

In Herstellerkatalogen und Auslegungstools werden üblicherweise die Kälteleistung ($\dot{Q}_0$) sowie Leistungsaufnahme des Verdichters (P_{el}) in Abhängigkeit von Verdampfungs- (T_0) und Verflüssigungstemperatur (T_c) angegeben. Aus den beiden Grössen kann der Coefficient of Performance (COP) berechnet werden - oft wird dieser auch direkt ausgewiesen.

$$COP = \frac{\dot{Q}_0}{P_{el}} \tag{5}$$

Mit der Leistungszahl COP werden zwei dem System zugeführte Energieströme verglichen, weshalb es sich nicht um einen Wirkungsgrad handelt. Die Leistungszahl kann Werte grösser als eins annehmen. Zudem verändert sich die Leistungszahl je nach Betriebspunkt. Um dennoch eine Art “Wirkungsgrad“ zu ermitteln, wird der ideale Carnot-Prozess als Vergleich verwendet.

$$\varepsilon_c = \frac{T_0}{T_c - T_0} \tag{6}$$

$$\eta_c = \frac{COP}{\varepsilon_c} \tag{7}$$

Der COP ist das Verhältnis von erzeugter Kälteleistung zur eingesetzten elektrischen Leistung. Für die Beschreibung der Verdichtung existieren zusätzliche Kennzahlen, welche die Unterschiede der verschiedenen Verdichterbauarten besser darstellen, dafür aber nicht so einfach in der Interpretation sind.

Aus der Energiebilanz des Verdichters kann der energetische Wirkungsgrad (η_{en}) gebildet werden. Hierzu müssen die dem Verdichter zugeführten mit den abgeführten Energieströmen verglichen werden. Die Energieströme sind in Abbildung 17 schematisch dargestellt.

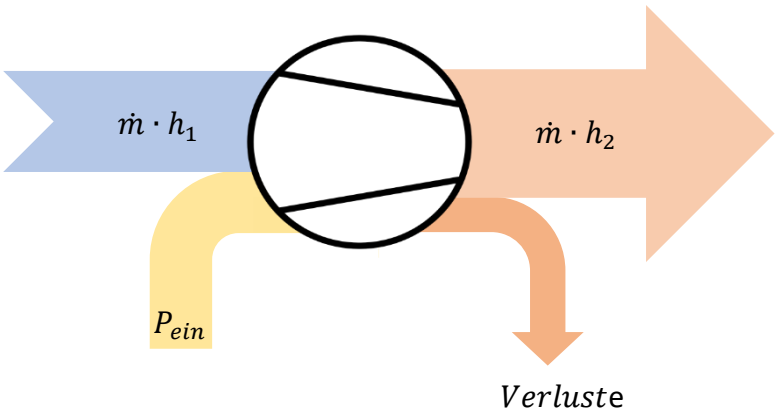


Abbildung 17 *- Energieströme am Kälteverdichter*

Zu beachten ist, dass sich die Systemgrenze je nach Verdichterbauart verändert. So ist die aufgenommene Leistung bei einem offenen Verdichter die mechanische Leistung der Antriebswelle. Bei einem hermetischen Verdichter hingegen handelt es sich um die elektrische Antriebsleistung. Auch die Verdichter-Baureihe hat Einfluss auf die Systemgrenze: Je nachdem, ob der Frequenzumrichter intern oder extern verbaut ist, werden dessen Verluste berücksichtigt oder nicht. Dies ist insbesondere bei einem Vergleich von Verdichtern verschiedener Bauarten bzw. Baureihen zu beachten.

$$\eta_{en} = 1 - \frac{Verluste}{P_{ein}} = \frac{\dot{m} \cdot (h_2 - h_1)}{P_{ein}} \tag{8}$$

Der energetische Wirkungsgrad beschreibt, wieviel der zugeführten Leistung tatsächlich im Primärkreislauf bzw. Kältemittel ankommt. Er ist somit ein Mass für die Wärmeabgabe des Verdichters an die Umgebung bzw. mögliche Kühlflüssigkeiten [5]. Für die Beschreibung der Effizienz des Verdichtungsprozesses wird ähnlich wie beim Carnot-Wirkungsgrad der ideale Vergleichsprozess herbeigezogen.

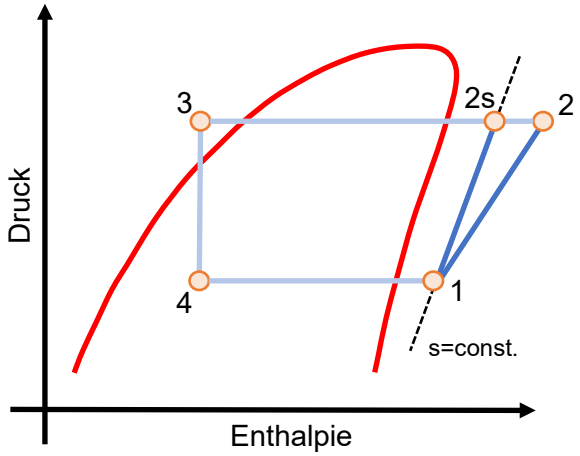


Abbildung 18 *- Isentroper Verdichterwirkungsgrad im log p-h Diagramm*

Die reversible adiabate Verdichtung ist der ideale Vergleichsprozess und entspricht einer Isentropen Zustandsänderung. Die Entropie (s) des Kältemittels bleibt dabei konstant. In der Abbildung 18 sind sowohl eine reale Verdichtung (1 → 2) als auch der ideale Vergleichsprozess (1 → 2s), dargestellt. Aus dem Verhältnis der spezifischen Arbeit der idealen Zustandsänderung zur realen Verdichtung kann der Isentrope Verdichterwirkungsgrad (η_{is}) gebildet werden.

$$\eta_{is} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \tag{9}$$

Der Isentrope Verdichterwirkungsgrad (η_{is}) beschreibt den Mehraufwand an zu leistender Druckänderungsarbeit aufgrund von Strömungsverlusten, Wärmeübertragung, innerer Leckage und Irreversibilität des Verdichtungsprozesses.

Der energetische- und der isentrope Verdichterwirkungsgrad können zum isentropen Gütegrad zusammenfasst werden. Der isentrope Gütegrad (η_i) zeigt das Verhältnis der idealen Zustandsänderung des Verdichters zur effektiv zugeführten Leistung und ist somit eine Art Gesamtwirkungsgrad des Verdichters.

$$\eta_i = \eta_{en} * \eta_{is} = \frac{\dot{m} \cdot (h_{2s} - h_1)}{P_{ein}} \tag{10}$$

Der Liefergrad ist eine weitere wichtige Kennzahl des Verdichters und beschreibt das Verhältnis des tatsächlichen Volumenstroms ($\dot{V}$) zum theoretisch möglichen Volumenstrom ($\dot{V}_{th}$) und wird wie folgt definiert:

$$\lambda = \frac{\dot{V}}{\dot{V}_{th}} = \frac{\dot{m} \cdot v_s}{V_{th} \cdot n \cdot f} \tag{11}$$

Der tatsächliche Volumenstrom wird aus dem Massenstrom ($\dot{m}$) und dem spezifischen Volumen (v_s) am Verdichter-Eintritt bestimmt. Der theoretisch mögliche Volumenstrom kann aus der Geometrie des Verdichters und der Arbeitsfrequenz (f) berechnet werden. Die Geometrie des Verdichters ist durch das theoretischen Fördervolumen (V_{th}) und die Anzahl Verdichtungskammern (n) definiert.

1.5. Betriebsverhalten

Verdichter

Die Effizienz einer Kältemaschine bzw. eines Verdichters ist sehr stark abhängig vom Betriebspunkt der Anlage. Wie in Kapitel «2.3 Kreisprozess» bereits beschrieben, ist der Betriebspunkt des Verdichters (T_0, T_c) über die Wärmetauscher an die Vorlauftemperatur des Kälteträgers bzw. die Umgebungstemperatur gekoppelt. Welchen Einfluss der Betriebspunkt der Anlage und die Effizienz des Verdichters auf die Leistungszahl haben, ist in den folgenden Diagrammen ersichtlich.

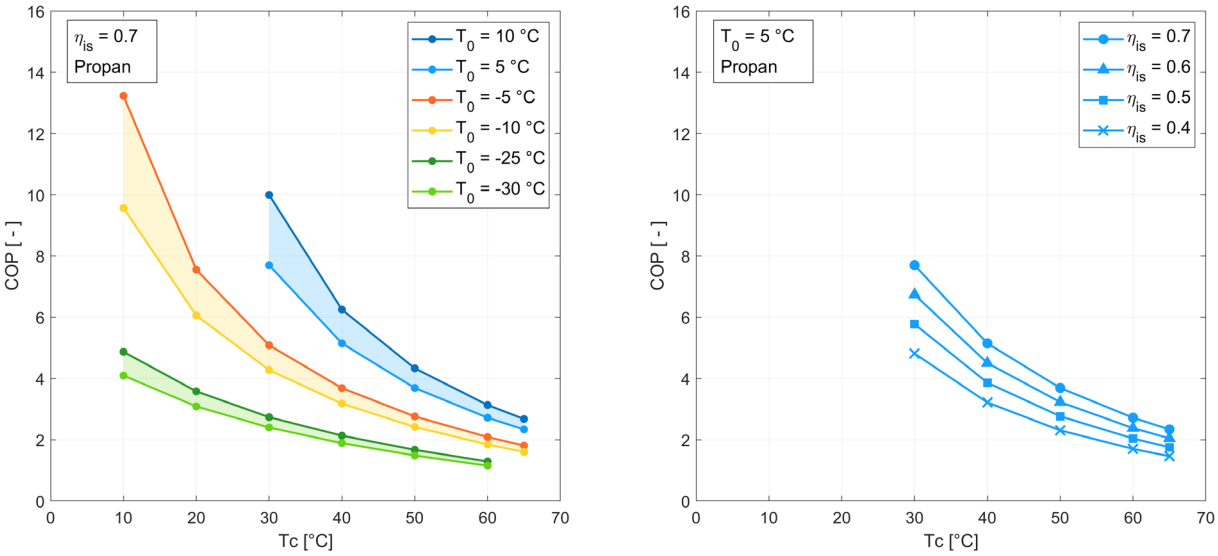


Abbildung 19 *- Betriebsverhalten - COP*

Im linken Diagramm ist der Verlauf des COP mit konstantem isentropen Verdichterwirkungsgrad bei unterschiedlichen Verdampfungstemperaturen dargestellt. Es ist sehr gut ersichtlich, dass die Leistungszahl unabhängig vom Verdichter stark betriebspunktabhängig ist. Die auf der x-Achse dargestellte Verflüssigungstemperatur ist an die Umgebungstemperatur gekoppelt und zeigt somit deren Einfluss auf die Effizienz der Anlage. Je wärmer die Umgebungstemperatur, desto höher ist auch die Verflüssigungstemperatur und desto ineffizienter läuft die Kältemaschine. Die Verdampfungstemperatur ist abhängig von der Kälteanwendung und kann nicht beliebig gewählt werden. Durch die schraffierte Fläche wird jedoch beispielhaft verdeutlicht, welche Effizienzverbesserung erreicht werden kann, wenn die Verdampfungstemperatur um 5 °C erhöht wird. Eine für die Anwendung optimierte Verdampfungstemperatur ist genauso wichtig wie die Wahl der richtigen Verdichterbauart.

Im rechten Diagramm ist der Verlauf des COP bei konstanter Verdampfungstemperatur mit unterschiedlichen isentropen Verdichterwirkungsgraden dargestellt. Diese Darstellung zeigt somit den Einfluss des Verdichters auf die Effizienz der Anlage. Der isentrope Verdichterwirkungsgrad ist jedoch keine Konstante, sondern ebenfalls betriebspunktabhängig. Sein Verlauf ist stark abhängig von der Charakteristik einer Verdichterbauart, weshalb sich unterschiedliche Verdichterbauarten für unterschiedliche Anwendungen besonders eignen.

Das Verhalten der Kälteleistung eines Verdichters ist ebenfalls wichtig für die Beurteilung der Verdichterbauart. Die Kälteleistung wird gemäss folgender Gleichung berechnet.

$$\dot{Q}_0 = \dot{m} * (h_1 - h_4) = \lambda * \dot{V}_{th} * \rho_1 * (h_1 - h_4) \quad (12)$$

Die Kälteleistung ist das Produkt aus Kältemittelmassenstrom und Enthalpie-Differenz über dem Verdampfer. Die Enthalpie-Differenz über dem Verdampfer ist abhängig vom Betriebspunkt sowie den Stoffeigenschaften des verwendeten Kältemittels. Aufgrund des Verlaufs der Siedelinie nimmt bei gleichbleibender Unterkühlung (UK) die Enthalpie-Differenz $(h_1 - h_4)$ über dem Verdampfer zu, wenn die Verflüssigungstemperatur reduziert wird. Dies ist in Abbildung 20 schematisch dargestellt.

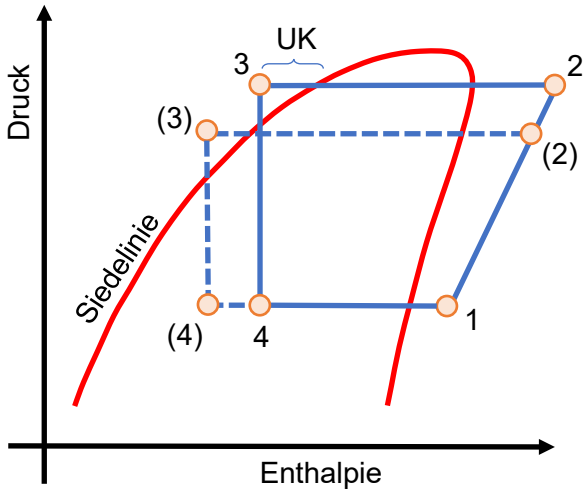


Abbildung 20 *- Unterschiedliche Verflüssigungstemperaturen im log p-h Diagramm*

Die zweite Einflussgrösse auf die Kälteleistung ist der Massenstrom. Der Massenstrom wird durch die Baugrösse des Verdichters beeinflusst: Ein grosser Verdichter hat ein grosses theoretisches Fördervolumen und liefert somit einen grossen Massenstrom. Der reale Massenstrom weicht jedoch je nach Betriebspunkt und Verdichter unterschiedlich stark vom theoretischen Massenstrom ab. Der Verlauf des Liefergrades ist abhängig von der Differenz zwischen Verdampfungs- und Verflüssigungstemperatur. Dies liegt daran, dass die innere Leckage, welche einen Energiefluss aus Kammern höheren Druckes in Kammern niedrigeren Druckes bedeutet [5], bei höheren Druckdifferenzen grösser wird. Der Liefergrad wird daher bei grossen Druckdifferenzen kleiner. Bei Hubkolbenverdichter wird dieser Effekt aus Gründen der Rückexpansion zusätzlich verstärkt.

Der Einfluss des Betriebspunktes, der Kältemitteleigenschaften sowie des Verdichters auf den Massenstrom ist in den folgenden beiden Diagrammen ersichtlich:

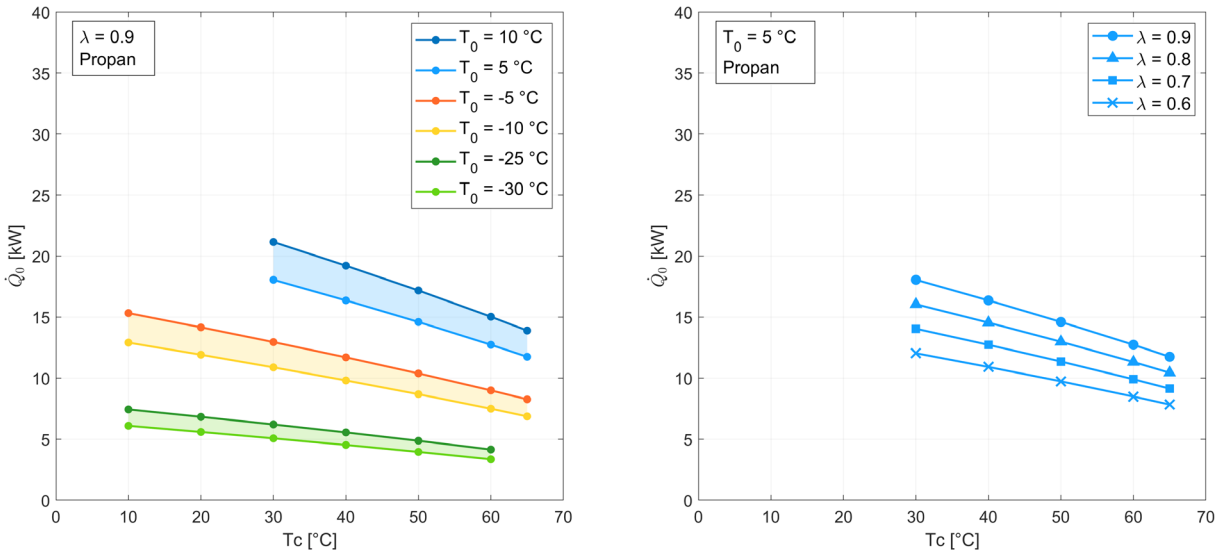


Abbildung 21 *- Betriebsverhalten - Kälteleistung*

Im linken Diagramm ist der Liefergrad des Verdichters bei allen Betriebspunkten konstant. In diesem Diagramm ist somit der Einfluss des Betriebspunktes sowie der Kältemitteleigenschaften von Propan auf die Kälteleistung ersichtlich. Je tiefer die Verdampfungstemperatur gewählt wird, desto kleiner werden Verdampfungsdruck und Dichte des Kältemittels am Verdichtereintritt. Der Massenstrom und die Kälteleistung nehmen ab. Werden Betriebspunkte mit konstanter Verdampfungstemperatur verglichen, bleibt der Massenstrom konstant und der Einfluss der Siedelinie auf die Enthalpie-Differenz wird ersichtlich. Die Kälteleistung der Kältemaschine nimmt mit sinkender Umgebungs- bzw. Verflüssigungstemperatur zu. Je nach Kältemittel bzw. Verlauf der Siedelinie ist diese Zunahme unterschiedlich stark.

Im rechten Diagramm ist die Verdampfungstemperatur und somit die Dichte am Verdichtereintritt konstant. Die unterschiedliche Kälteleistung von Betriebspunkten mit gleicher Verflüssigungstemperatur ist somit auf den Liefergrad bzw. dessen Einfluss auf den Massenstrom zurückzuführen. Auch hier gilt zu beachten, dass der Liefergrad nicht über alle Betriebspunkte konstant ist und je nach Verdichter einen anderen Verlauf aufweist.

Leistungsregelung & Einsatzgrenzen

Durch die Leistungsregelung kann die Kälteleistung des Verdichters angepasst werden. Hierzu gibt es, wie in Kapitel «Leistungsregelung» bereits beschrieben, verschiedene Möglichkeiten. Die Kälteleistung ist das Produkt der Enthalpie-Differenz über dem Verdampfer und dem Kältemittel-Massenstrom. Die Enthalpie-Differenz über dem Verdampfer ist stark vom Betriebspunkt abhängig und wird durch den Verdichter nur bedingt beeinflusst. Die Leistungsregelung erfolgt somit bei allen Leistungsregelungstypen über eine Anpassung des Massenstroms.

In dieser Untersuchung wird lediglich die Leistungsregelung durch Inverter untersucht. Diese Leistungsregelung ist bei allen Verdichterbauarten und bei allen Herstellern verfügbar, was für eine Neutralisierung der Daten wichtig ist. Bei der Leistungsregelung mit Inverter wird mittels variabler Verdichterfrequenz die Drehzahl des Verdichters variiert, wodurch sich der geförderte Massenstrom verändert. Der Einfluss der Leistungsregelung auf das Betriebsverhalten ist in folgendem Diagramm dargestellt.

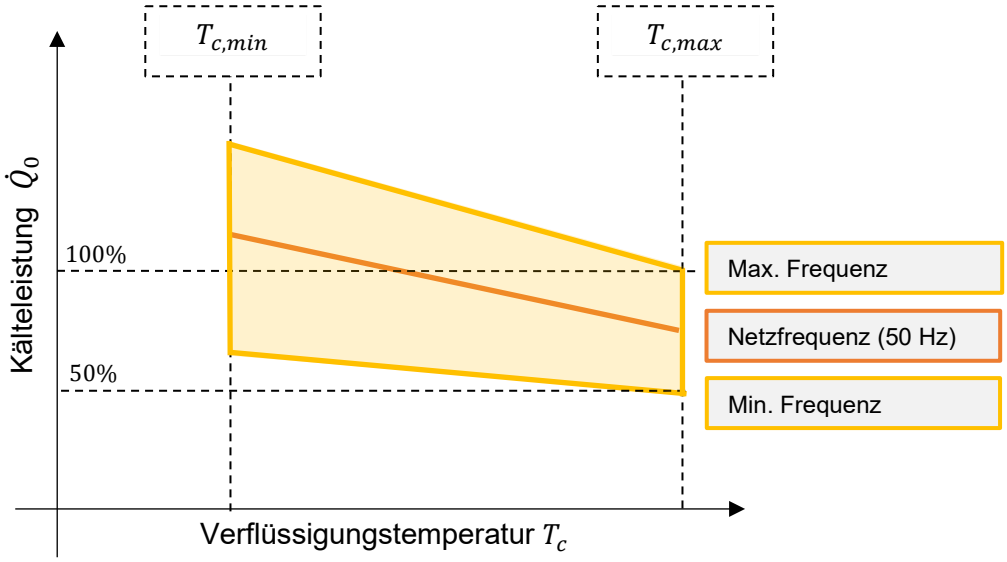


Abbildung 22 *- Verdichterkennfeld mit Leistungsregelung*

Das Betriebsverhalten eines Verdichters ohne Leistungsregelung ist bei konstanter Verdampfungstemperatur und variabler Verflüssigungstemperatur eine Kurve. Wird der Verdichter mit einer Drehzahlregelung erweitert, wird das Betriebsverhalten mit einer Kurve pro Frequenz abgebildet. Es entsteht somit eine Kurvenschar, welche durch die minimale und maximale Frequenz begrenzt wird, die daraus resultierende Fläche ist das Verdichterkennfeld. Der zulässige Frequenzbereich kann je nach Hersteller, Kältemittel und Verdichterbauart variieren.

Das Betriebsverhalten bei maximaler und minimaler Frequenz entspricht der oberen und unteren Grenze des Kennfeldes. Eine zusätzliche Limitation sind die Einsatzgrenzen des Verdichters. Wie in Kapitel «Einsatzgrenzen» bereits beschrieben, kann die Verflüssigungstemperatur nicht beliebig reduziert werden, das Verdichterkennfeld wird daher seitlich durch die minimal und maximal zulässige Verflüssigungstemperatur begrenzt.

Lastprofile

Für die Beurteilung, ob eine Verdichterbauart bzw. ein Kältemittel für eine Anwendung geeignet ist, sind die benötigte Kälteleistung und Temperaturen entscheidend. Dies reduziert die Auswahl an möglichen Verdichterbauarten bereits auf einige wenige mögliche Optionen. Welche der verfügbaren Verdichterbauarten am besten für die jeweilige Anwendung geeignet ist, hängt sehr stark von der geplanten Nutzung der Kältemaschine bzw. dem Lastprofil der Kälteleistung ab.

Für die Abbildung von Lastprofilen gibt es unterschiedliche Methoden. In der Regel wird die Kälteleistung an einem Auslegungspunkt definiert - dies entspricht dann der Nennleistung. Gemäss der Nennleistung werden Verdichter bzw. die komplette Kälteanlage dimensioniert. Anschliessend wird die Nennleistung je nach geplantem Betriebsprofil für ganze Monate oder einzelne Aussentemperaturen reduziert. In dieser Untersuchung ist die Kältelast abhängig von der Nutzung sowie der Aussentemperatur.

Die Kältelast kann vereinfacht in zwei Varianten eingeteilt werden. Die einfachere Variante ist eine konstante Last, unabhängig von der Umgebungstemperatur, über das ganze Jahr. Solche Lastprofile sind in der Regel in der Prozesstechnik anzutreffen. Die zweite Variante ist abhängig von der Umgebungstemperatur und somit variabel. Diese Lastprofile sind typisch bei der Kühlung von Gebäuden, weil die benötigte Kälteleistung abhängig vom Temperaturunterschied zwischen Raum- und Aussentemperatur ist. Im Hochsommer ist der Temperaturunterschied besonders gross, deshalb ist auch der Kühlbedarf am höchsten. Diese Lastprofile haben zudem eine Kühlsaison, da der Kühlbedarf bei der Kühlgrenze Null wird. Die beiden Varianten sind in der Abbildung 23 dargestellt.

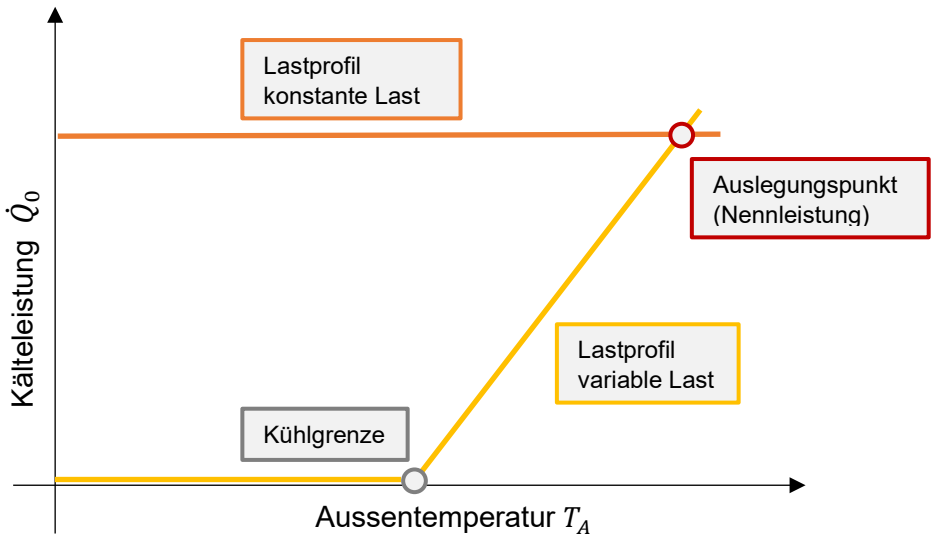


Abbildung 23 *- Unterschiedliche Lastprofile*

Diese beiden Varianten sind Extrembetrachtungen. In der Realität finden sich häufig Lastprofile, welche eine Mischung aus den beiden genannten Lastprofilen darstellen. Ein Teil der anfallenden Last ist über das ganze Jahr konstant, der restliche Teil ist variabel je nach Umgebungstemperatur. Die Kombination der beiden Varianten ist in der folgenden Abbildung dargestellt:

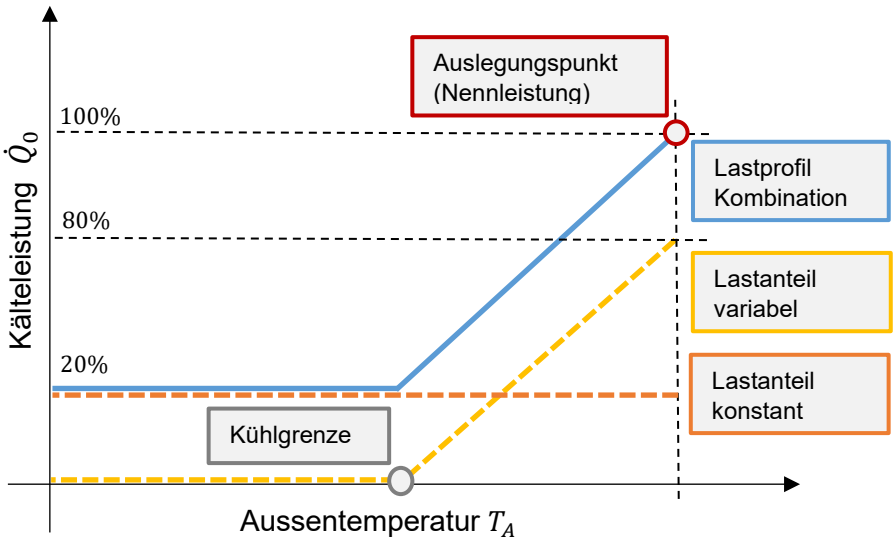


Abbildung 24 *- Kombination von Lastanteilen*

Das in Abbildung 24 dargestellte kombinierte Lastprofil hat sowohl konstante Lastanteile über das ganze Jahr als auch von der Aussentemperatur abhängige, variable Lastanteile. Auch bei kombinierten Lastprofilen gibt es einen Auslegungspunkt, an welcher die Nennleistung definiert wird. Zusätzlich muss der Anteil der konstanten Last zur Nennleistung sowie die Kühlgrenze definiert werden. In dieser Untersuchung werden Lastprofile mit unterschiedlichen Anteilen konstanter Last untersucht, die Kühlgrenze bleibt aber jeweils bei 16 °C.

Betriebsart Verdichter

Das Betriebsverhalten des Verdichters bzw. der Kältemaschine wurde in Kapitel «2.5 Betriebsverhalten» bereits beschrieben. Aufgrund des Verlaufs der Siedelinie steigt bei sinkender Verflüssigungs- bzw. Umgebungstemperatur die Enthalpie-Differenz über dem Verdampfer und die Kälteleistung nimmt zu. Das Lastprofil bzw. der Kältebedarf der Anlage und das Betriebsverhalten des Verdichters haben sehr häufig ein gegenläufiges Verhalten.

Was dies in der Praxis bedeutet wird klar, wenn das Betriebsverhalten des Verdichters mit einem Lastprofil kombiniert wird.

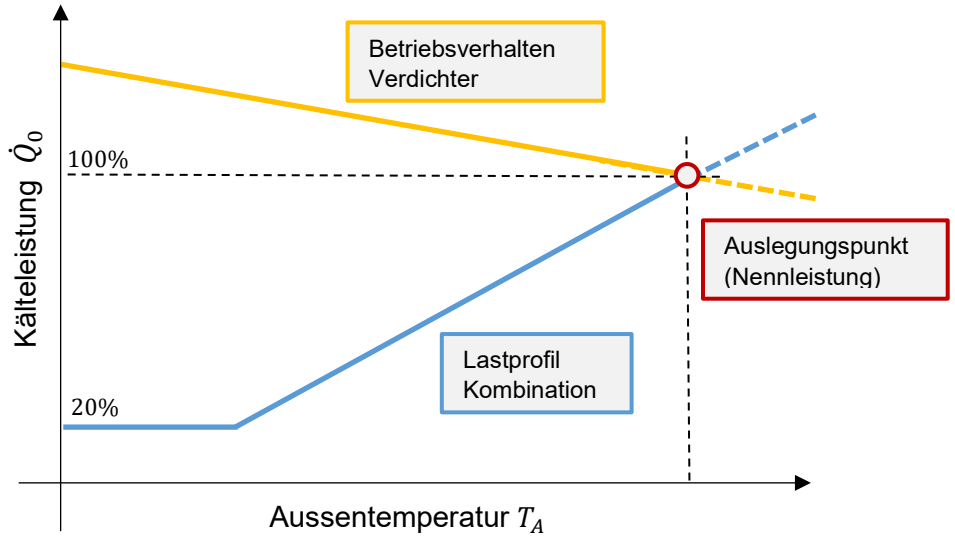


Abbildung 25 *- Vergleich Betriebsverhalten Verdichter und Lastprofil*

In Abbildung 25 ist der Zusammenhang zwischen Kältebedarf bzw. Lastprofil der Anlage sowie das Verhalten des Verdichters in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur dargestellt. Im Auslegungspunkt stimmen Nennleistung und Kältebedarf überein. Werden die Umgebungstemperaturen wärmer als der Auslegungspunkt, kommt es zu einer Unterversorgung - der Verdichter bzw. die Kälteanlage kann den benötigten Kältebedarf nicht decken. Aus diesem Grund werden Kältemaschinen bei sehr hohen Umgebungstemperaturen ausgelegt und dimensioniert, obwohl es fast keine Betriebsstunden an diesen Betriebspunkten gibt.

Je milder die Umgebungstemperaturen werden, desto grösser wird der Unterschied zwischen Kältebedarf und Kälteleistung des Verdichters. Wird ein Verdichter ohne Leistungsregelung verwendet, kann die Kälteleistung des Verdichters nicht dem Bedarf angepasst werden und der Verdichter geht in einen Ein/Aus Betrieb - er fängt an zu Takten.

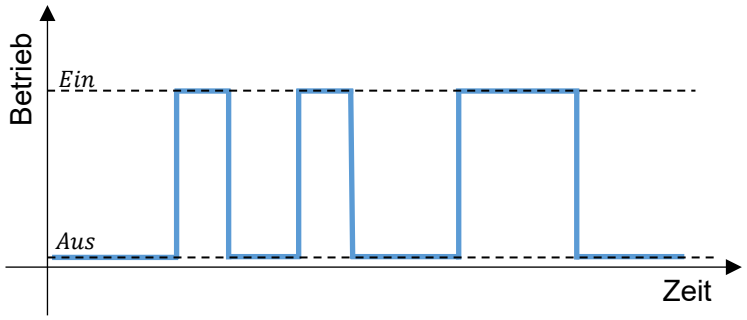


Abbildung 26 *- Taktbetrieb Verdichter*

Wie in Abbildung 26 ersichtlich ist, führt der Taktbetrieb zu vielen Ein- und Ausschaltvorgängen der Anlage. Bei jedem Einschaltvorgang wird die Kältemaschine hochgefahren und schwingt sich ein, bevor sie in einen stationären Betrieb geht. Die Kältemaschine bzw. der Verdichter ist während des Hochfahrens weniger effizient, weshalb sich der Taktbetrieb negativ auf den Stromverbrauch auswirkt. Je grösser die Differenz zwischen Kältebedarf und Kälteerzeugung ist, desto kürzer dauert der stationäre Betrieb der Anlage und desto stärker ist der Einfluss des Einschaltens. Zudem ist zu beachten, dass der Verschleiss des Verdichters beim Ein- und Ausschalten besonders gross ist. Deshalb führt der Taktbetrieb auch zu einer kürzeren Lebensdauer der Anlage.

Durch eine Leistungsregelung werden der Massenstrom des Verdichters und somit auch die Kälteleistung variabel. Das Verhalten des Verdichters in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur wird zu einem Kennfeld. Nimmt der Kältebedarf bei sinkender Umgebungstemperatur ab, beginnt der Verdichter zu modulieren und passt die Kälteleistung dem Kältebedarf an. Sobald die untere Grenze des Verdichterkennfeld erreicht wird, kann der Verdichter die Kälteleistung nicht mehr an den Kältebedarf anpassen und der Verdichter beginnt zu Takten. Das beschriebene Verhalten eines Verdichters mit stufenloser Leistungsregelung ist in Abbildung 27 dargestellt.

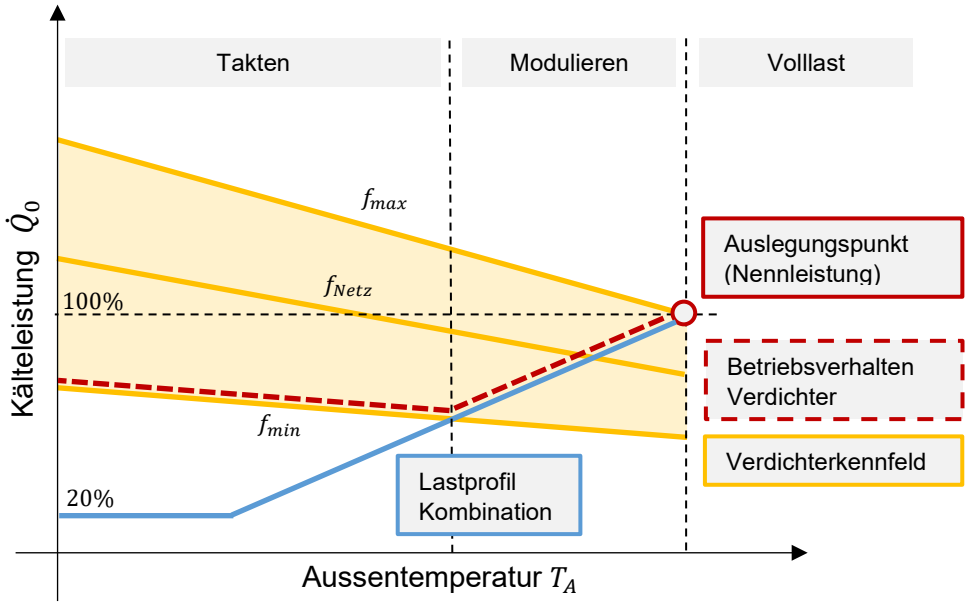


Abbildung 27 *- Betriebsarten Verdichter*

Volllast:
Unter Volllast versteht man, dass der Verdichter im Nennbetrieb ist. Das heisst, dass keine Leistungsregelung aktiv ist und der Verdichter permanent auf maximaler Drehzahl läuft. Das ist in der Regel bei Verflüssigungstemperaturen oberhalb des Auslegungspunkts der Fall.

Modulieren:
Wenn der Kältebedarf des Verbrauchers kleiner ist als die gelieferte Kälteleistung im entsprechenden Betriebspunkt, fängt der Verdichter an zu modulieren (Drehzahlanpassung). Durch die Leistungsregelung wird die Kälteleistung reduziert und am Kältebedarf angepasst. In Abbildung 27 wird exemplarisch eine stufenlose Leistungsregelung gezeigt.

Takten:
Sobald die untere Grenze der Leistungsregelung erreicht ist, fängt der Verdichter an zu takten. Es beginnt ein Ein/Aus-Betrieb mit negativem Einfluss auf die Effizienz und den Verschleiss des Verdichters. Ein Verdichter ohne Leistungsregelung ist somit fast ausschliesslich im Taktbetrieb.

Betriebsstunden

Wie in Kapitel «2.5 Betriebsverhalten» bereits erwähnt, sind sowohl das Verhalten des Verdichters als auch das Lastprofil abhängig vom Betriebspunkt bzw. der Umgebungstemperatur. Für die energetische Beurteilung sind deshalb die Stundenhäufigkeiten verschiedener Umgebungstemperaturen ein wichtiger Faktor. In Abbildung 28 sind die Häufigkeiten der stündlichen Mittelwerte der Aussentemperaturen von sieben Schweizer Städten über ein Jahr dargestellt.

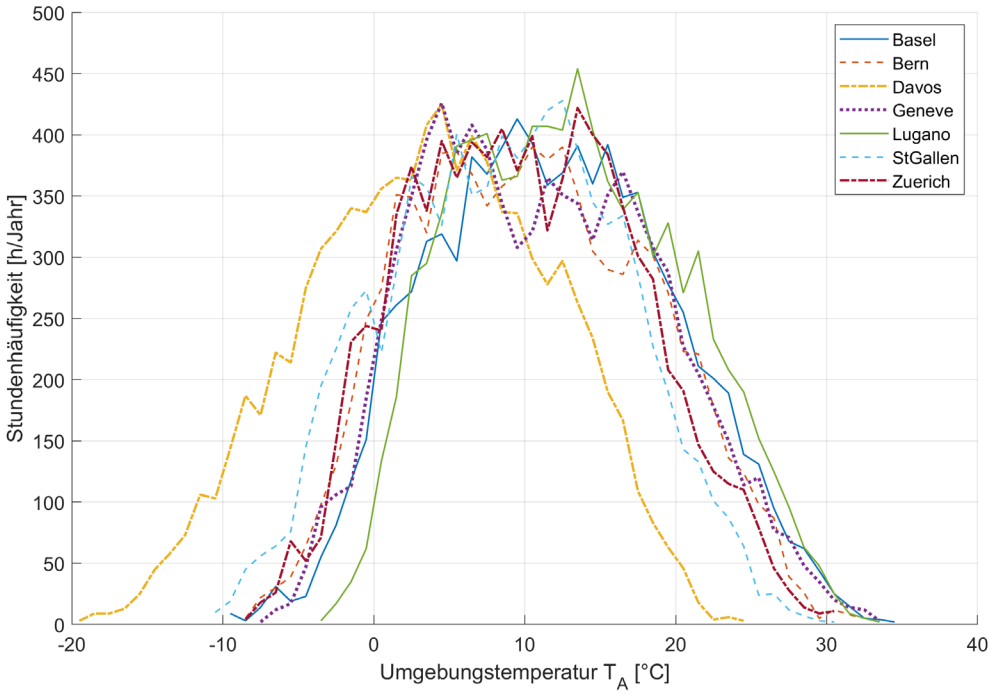


Abbildung 28 *- Stundenhäufigkeit von Umgebungstemperaturen*

Im Diagramm ist sehr gut zu erkennen, dass es grosse Unterschiede von Stundenhäufigkeiten der Aussentemperaturen zwischen den verschiedenen Standorten gibt. Für die Bewertung einer Verdichterbauart ist der Standort somit von grosser Bedeutung, da der Verdichter an den Betriebspunkten besonders effizient betrieben werden soll, die auch sehr häufig vorkommen. Zudem ist ersichtlich, dass der Verdichter nur wenige Stunden pro Jahr am Auslegungspunkt betrieben wird.

In Abbildung 29 sind die Anzahl Stunden, an denen die Temperatur oberhalb einer bestimmten Aussentemperatur ist, aufsummiert dargestellt. Ein Kalenderjahr hat 8760 Stunden. Diese Darstellungsform wird kumulative Temperaturhäufigkeitsverteilung genannt und ist besonders geeignet, um die Auswirkungen der Absenkung der Verflüssigungstemperatur oder Einsatzgrenzen von Komponenten aufzuzeigen [6]. Die Verflüssigungstemperatur ist über Temperaturdifferenzen an die Aussentemperatur gekoppelt. Die Temperaturdifferenz (ΔT_V) kann in der kumulativen Temperaturhäufigkeitsverteilung der Aussentemperatur eingetragen werden, um eine vereinfachte kumulative Häufigkeitsverteilung der Verflüssigungstemperatur zu erhalten.

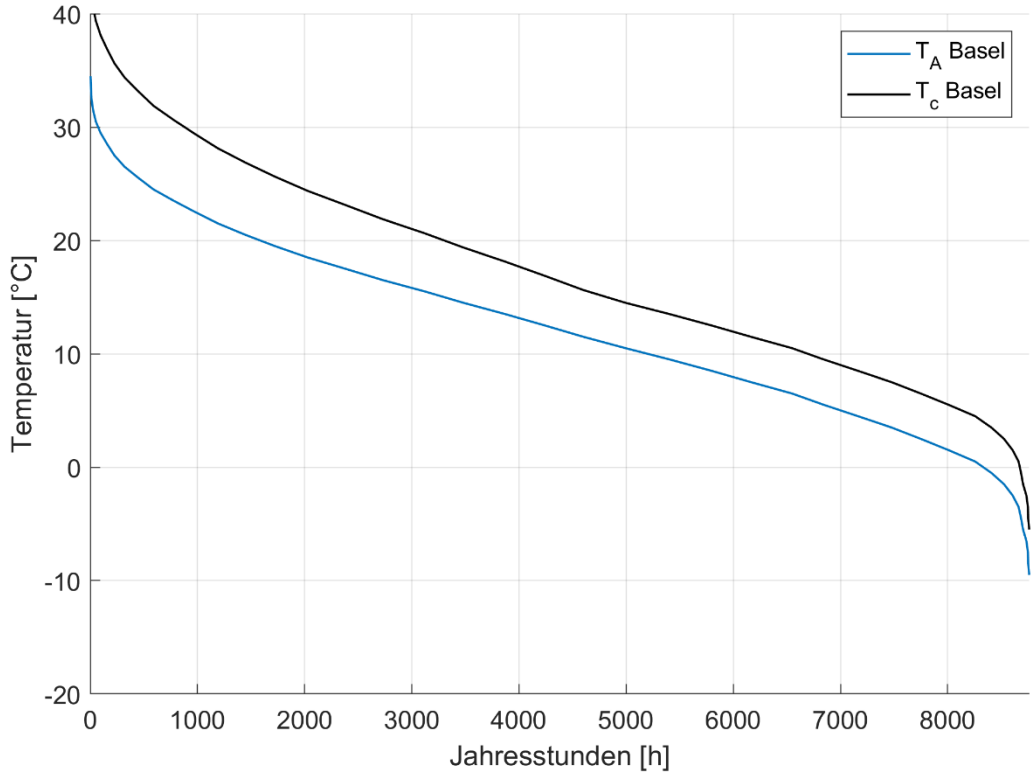


Abbildung 29 *- Kumulative Temperaturhäufigkeitsverteilung*

In Abbildung 29 ist ersichtlich wie die Verflüssigungstemperatur dem Verlauf der Aussentemperatur folgt. Der dargestellte Verlauf der Verflüssigungstemperatur zeigt das theoretische Potential, welches mit den gegebenen Temperaturen möglich ist. Dieser Verlauf wird jedoch durch die Einsatzgrenzen der Komponenten limitiert - insbesondere von Expansionsventil und Verdichter. Zudem wird der Bereich aus Gründen der Betriebssicherheit teilweise zusätzlich eingeschränkt. Dabei ist wichtig zu beachten, dass diese Limitationen und Einschränkungen zu grossen Einbussen in der Effizienz des Verdichters bzw. der Anlage führen.

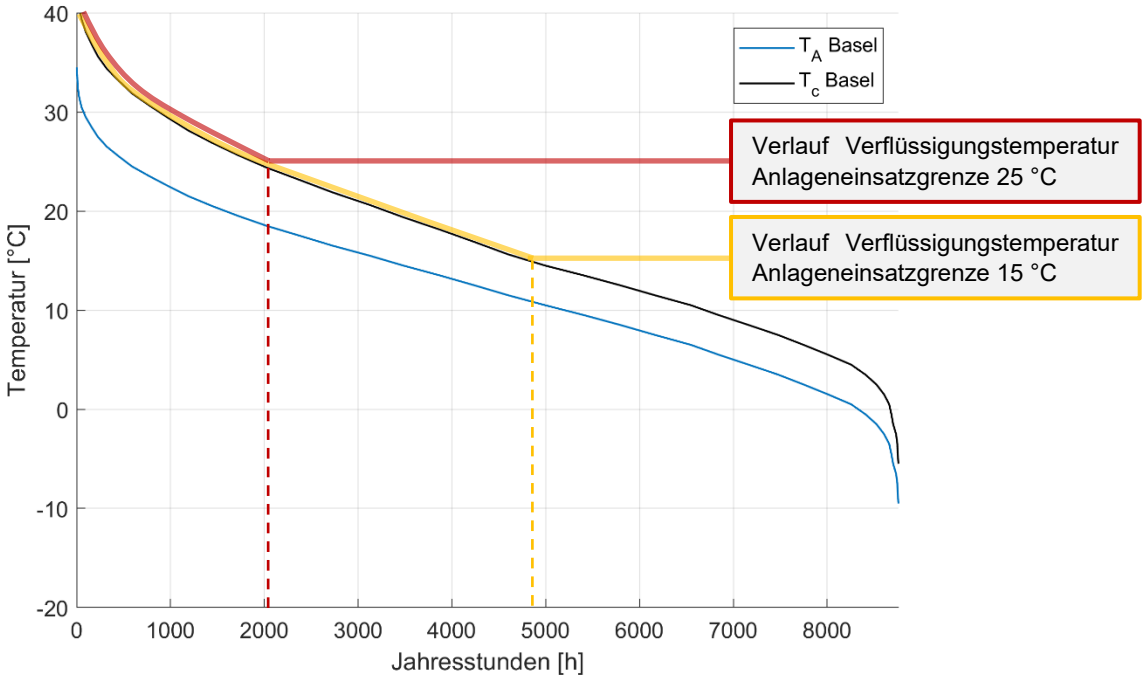


***Abbildung 30** - Einfluss Anlagen-Einsatzgrenzen auf Effizienz*

In der Abbildung 30 ist die kumulative Häufigkeitsverteilung der Verflüssigungstemperatur durch die Anlageneinsatzgrenze erweitert worden. Die Anlageneinsatzgrenze wird durch die restriktivste Komponente der Anlage definiert. Deshalb ist es wichtig, dass alle Komponenten im Kältekreis gut aufeinander abgestimmt sind. In dieser Untersuchung liegt der Schwerpunkt auf dem Verdichter, deshalb entspricht die Anlageneinsatzgrenze der Verdichtereinsatzgrenze. Ist die Anlagen- bzw. Verdichtereinsatzgrenze bei 25 °C, kann die Anlage rund 2000 Stunden im Jahr optimal betrieben werden. Bei den restlichen 6760 Stunden muss die Verflüssigungstemperatur künstlich hochgehalten werden, was sich negativ auf die Effizienz auswirkt. Liegt die Verdichter-Einsatzgrenze bei 15 °C, kann die Anlage bereits rund 5000 Stunden im Jahr optimal betrieben werden. Eine solche Anlage kann also rund 3000 Stunden im Jahr an effizienteren Betriebspunkten betrieben werden. Zu beachten ist jedoch, dass die Kältemaschine nicht das ganze Jahr läuft. Deshalb muss zwischen Jahresstunden und effektiven Betriebsstunden unterschieden werden. Die Anlagen- bzw. Verdichtereinsatzgrenze ist zudem abhängig von der Kälteanwendung bzw. der Verdampfungstemperatur.

2. Datenerhebung

In diesem Kapitel wird die Datengrundlage dieser Untersuchung genauer Beschrieben.

2.1. Wetterdaten

Die Wetterdaten stammen aus dem Datenportal IDAweb vom Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz. Verwendet wird die stündliche Durchschnittstemperatur (2m über Boden) der Jahre 2015-2020. Folgende Wetterstationen werden für die Untersuchung verwendet.

Standort:	**Wetterstation**
Basel:	Basel / Binningen
Bern:	Bern / Zollikofen
Davos:	Davos
Genf:	Genève / Cointrin
Kloten:	Zürich / Kloten
Lugano:	Lugano
St. Gallen:	St. Gallen

Für die Auswertung wird die jährliche Stundenhäufigkeit der Umgebungstemperaturen an unterschiedlichen Standorten verwendet. Basierend auf den Wetterdaten der Jahre 2015-2020 wird für jeden Standort eine durchschnittliche jährliche Häufigkeitsverteilung der Umgebungstemperaturen bestimmt. Der Unterschied der einzelnen Jahre des Standortes Basel sowie das verwendete Durchschnittsjahr sind in der Abbildung 31 dargestellt. Die Diagramme der weiteren Standorte sind im Anhang ersichtlich.

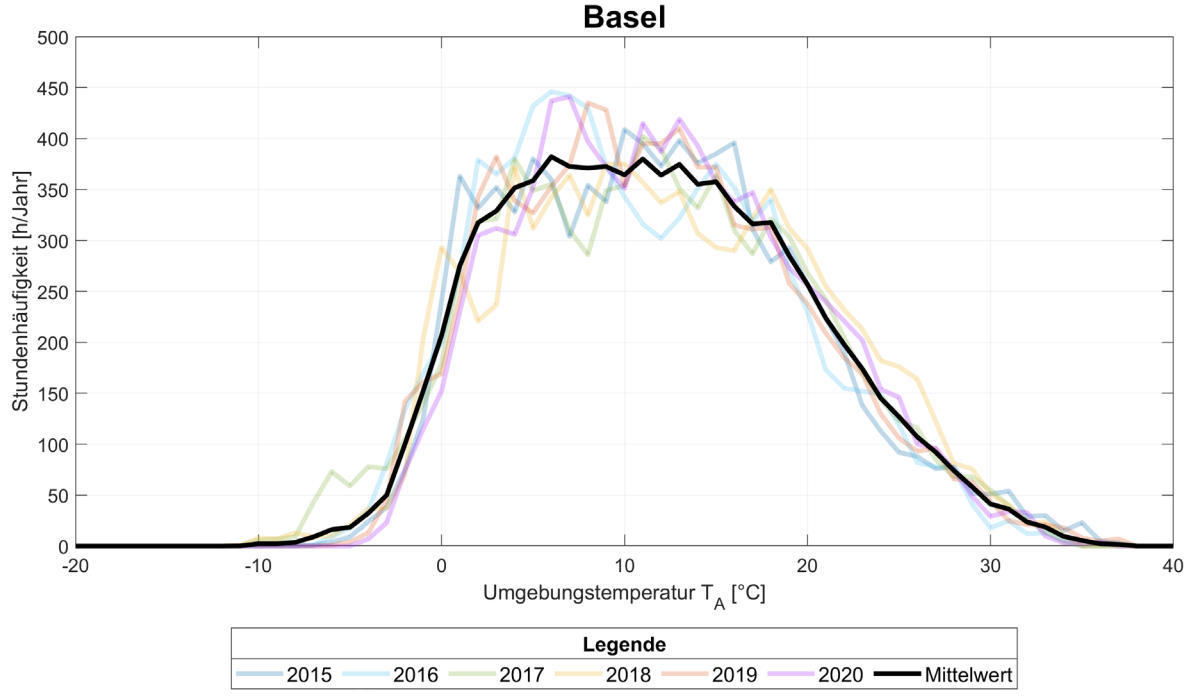


***Abbildung 31** - Stundenhäufigkeitsverteilung Umgebungstemperaturen Basel (2015 - 2020)*

2.2. Verdichterdaten

Die Darstellung von Leistungsdaten der Verdichter ist in der Norm EN 12900 definiert. Mittels Verdichter-Polynomen lassen sich Kälteleistung, Leistungs- und Stromaufnahme sowie der Kältemittelmassenstrom in Abhängigkeit zur Verdampfungs- und Verflüssigungstemperatur bestimmen. Die Koeffizienten der Verdichter-Polynome sind in den Auslegungstools der Hersteller verfügbar. Für die Verdichter-Daten der Turboverdichter sind keine Verdichter-Polynome vorhanden, daher werden lediglich einzelne Arbeitspunkte angegeben. Diese wurden mittels Auslegungstool der Hersteller berechnet.

Die Verdichter-Polynome gelten nur für eine Frequenz. Zur Darstellung des Verdichterkennfeldes werden daher für jeden Verdichter mehrere Polynome benötigt. Verdichter, welche eine Leistungsregelung haben, aber lediglich Leistungsdaten bei Netzfrequenz zugänglich sind, werden als Verdichter ohne Leistungsregelung betrachtet. Für diese Untersuchung werden Verdichter-Polynome von mehreren Herstellern gesammelt und neutralisiert. Hersteller, welche Ihre Leistungsdaten nicht zugänglich machen, können in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt werden. Für folgende Kältemittel und Kälteleistungen wurden Verdichter-Daten gesammelt:

***Tabelle 1** – Übersicht Verdichterdaten*

Kälteanwendung	Kältemittel	Kälteleistung
Klimakälte «mit Entfeuchtung, Teilentfeuchtung» *Auslegungspunkt (T_0/T_c): 5/45 °C*	R1234ze R290 R454B R513A R717 R744	 20 kW * 50 kW * 100 kW * 300 kW *
Pluskühlung «Gastro, Bäckereien» *Auslegungspunkt (T_0/T_c): -10/45 °C*	R449A R513A R744	2 kW * 10 kW * 50 kW * 100 kW *
Minuskühlung *Auslegungspunkt (T_0/T_c): -30/40 °C*	R449A R744	1 kW * 5 kW * 25 kW * 50 kW *

* Kälteleistung am Auslegungspunkt

Sowohl die Kälteleistung als auch das Kältemittel können die Wahl der Verdichterbauart einschränken - einige Verdichterbauarten sind z.B. erst in grösseren Leistungsbereichen verfügbar. Zudem sind nicht alle beliebigen Kombinationen von Verdichterbauarten und Kältemitteln möglich. Die Verdichterhersteller sind teilweise gerade dabei, Ihr Sortiment auf die untersuchten Kältemittel umzustellen. Deshalb ist es möglich, das gewisse Verdichterdaten zum Zeitpunkt der Datenerfassung noch nicht verfügbar waren und deshalb nicht abgebildet sind.

Für jede Kombination von Kälteanwendung, Kältemittel und Kälteleistung werden Verdichterdaten aller verfügbaren Verdichterbauarten von mehreren Herstellern gesammelt. Das Ziel dieser Untersuchung ist, die Unterschiede der verschiedenen Verdichterbauarten aufzuzeigen, nicht der Vergleich von Herstellern. Deshalb werden die Daten der Verdichterbauarten von mehreren Herstellern zusammengefasst und neutralisiert.

Die Kälteleistung des Verdichters am Auslegungspunkt stimmt häufig nicht mit der vorgegebenen Selektion überein. Deshalb werden alle Verdichter, welche bei maximaler Frequenz die gewünschte Kälteleistung ±30 % erreichen, für eine Selektion berücksichtigt. Verdichter verschiedener Hersteller, welche diese Kriterien erfüllen, werden kombiniert und neutralisiert.

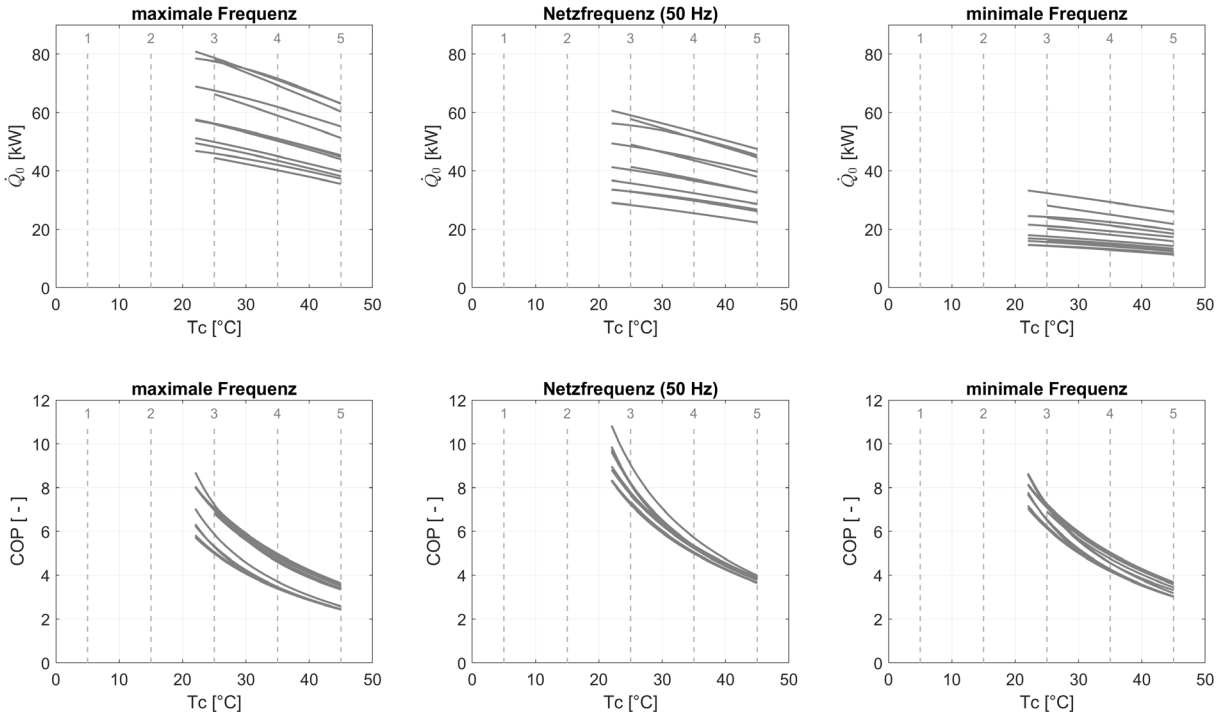


Abbildung 32 *- Neutralisierung von Verdichter-Selektionen*

In Abbildung 32 ist der Verlauf der Kälteleistung und des COP aller berücksichtigten Verdichter bei mehreren Frequenzen abgebildet. Obwohl alle Verdichter dieselbe Bauart haben, unterscheiden sich Einsatzgrenzen, Frequenzbereich und Verhalten der Verdichter. Es ist sehr gut zu erkennen, dass einige Verdichter bis zu einer Verflüssigungstemperatur von 22 °C betrieben werden können, andere Verdichter in dieser Selektion haben die Einsatzgrenzen jedoch bereits bei 25 °C. Die Unterschiede der Kälteleistung sind auf den betrachteten Leistungsbereich (±30 %) der Selektion zurückzuführen. Zudem ist zu erkennen, dass der COP der Verdichter bei minimaler sowie Netzfrequenz sehr ähnlich ist. Bei der maximalen Frequenz unterscheiden sich die Verdichter jedoch deutlich. Diese Unterschiede sind auf die Frequenzbereiche der Verdichter zurückzuführen. Bei einigen Verdichter liegt die maximale Arbeitsfrequenz höher als bei anderen, was sich im Verlauf des COP widerspiegelt.

Diese Unterschiede sind häufig sehr herstellerspezifisch, deshalb haben bei der Neutralisierung alle Hersteller dieselbe Gewichtung. Es werden zunächst die Mittelwerte aller Verdichter pro Hersteller und anschliessend die Mittelwerte aller Hersteller-Mittelwerte gebildet. Das resultierende, neutralisierte Verdichterkennfeld dieser Selektion ist in Abbildung 33 ersichtlich.

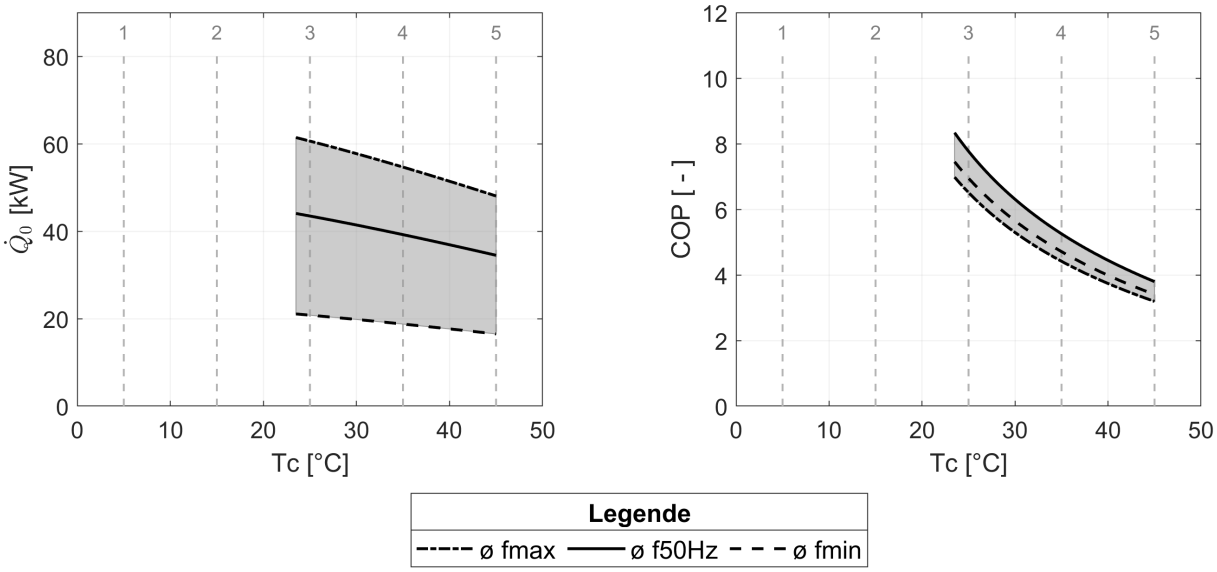


Abbildung 33 *- Neutralisiertes Verdichterkennfeld der Selektion*

Das neutralisierte Verdichterkennfeld in Abbildung 33 zeigt einen durchschnittlichen Verdichter der Selektion. Die fünf gestrichelten Linien entsprechend den Referenzbetriebspunkten, an denen die Verdichter verglichen werden. Dies wird in Kapitel «4 Energetische Bewertung - aCOP» noch genauer beschrieben. Der Verlauf der Kälteleistung bei unterschiedlichen Frequenzen zeigt den Regelbereich des neutralisierten Verdichters bei variablen Verflüssigungstemperaturen. Das linke Ende des Kennfeldes entspricht zudem der durchschnittlichen Einsatzgrenze der Verdichter. Im rechten Diagramm ist der Verlauf des COP bei unterschiedlichen Frequenzen abgebildet. Für die energetische Bewertung der Verdichter werden die neutralisierten Verdichterkennfelder verwendet.

Die Verdichterdaten werden bei einer definierten Unterkühlung nach dem Verflüssiger und nutzbaren Überhitzung nach dem Verdampfer generiert. Aus den gegebenen Verdichterpolynomen für Kälteleistung, Massenstrom und Leistungsaufnahme können deshalb zusätzliche Grössen wie Endverdichtungstemperatur und Isentroper Verdichterwirkungsgrad direkt berechnet werden. Diese werden in den Verdichterkennfelder ebenfalls angegeben.

Im Konfigurator werden weitere Zusatzinformationen wie z.B. Regulierbarkeit, Schallpegel oder Investitionskosten angegeben. Die Werte wurden in Zusammenarbeit mit den Experten definiert und basieren auf keinen wissenschaftlichen Kriterien.

3. Energetische Bewertung - aCOP

Im Kapitel «Betriebsstunden» ist ersichtlich, dass insbesondere luftgekühlte Kältemaschinen nur äusserst selten am Auslegungspunkt betrieben werden. Deshalb macht es wenig Sinn, die Effizienz des Verdichters lediglich am Auslegungspunkt zu beurteilen. Der SEER ist eine Kennzahl zur saisonalen Bewertung von Kältemaschinen und ist in der EN 14825 definiert. Aufgrund der unterschiedlichen Systemgrenzen kann die Kennzahl jedoch nicht zur Bewertung von Verdichtern verwendet werden.

Für die Bewertung der Verdichterbauarten wird die Kennzahl aCOP (Annual Coefficient of Performance) neu definiert. Die Methodik des aCOP basiert sehr stark auf den bestehenden Kennzahlen (SEER und ESEER) von Kältemaschinen im Teillastbetrieb und ist eine energetische Betrachtung.

Für die Bewertung der Verdichterbauarten werden hierzu mehrere Betriebspunkte verwendet, welche je nach Stundenhäufigkeit und Kältelast mittels Gewichtungsfaktor $(w_1, w_2, \dots, w_5)$ kombiniert werden. Kann die Kälteleistung aufgrund der Limitationen der Leistungsregelung nicht dem Kältebedarf angepasst werden, wird der COP am Betriebspunkt mit einem bauartabhängigen Taktungsfaktor $(c_1, c_2, \dots, c_5)$ reduziert.

Der aCOP wird gemäss folgender Gleichung bestimmt:

$$\mathrm{aCOP} = \mathrm{w_1} * \mathrm{c_1} * \mathrm{COP_1} + \mathrm{w_2} * \mathrm{c_2} * \mathrm{COP_2} + \mathrm{w_3} * \mathrm{c_3} * \mathrm{COP_3} + \mathrm{w_4} * \mathrm{c_4} * \mathrm{COP_4} + \mathrm{w_5} * \mathrm{c_5} * \mathrm{COP_5} \quad (13)$$

Die Bewertung der Verdichterbauarten basiert somit auf dem Standort und der Nutzung (bzw. Lastprofil) der Anlage sowie dem Verdichterkennfeld aus den Polynomen der EN 12900. Die Kombination von Verdichterkennfeld und Lastprofil ist in Abbildung 34 schematisch dargestellt.

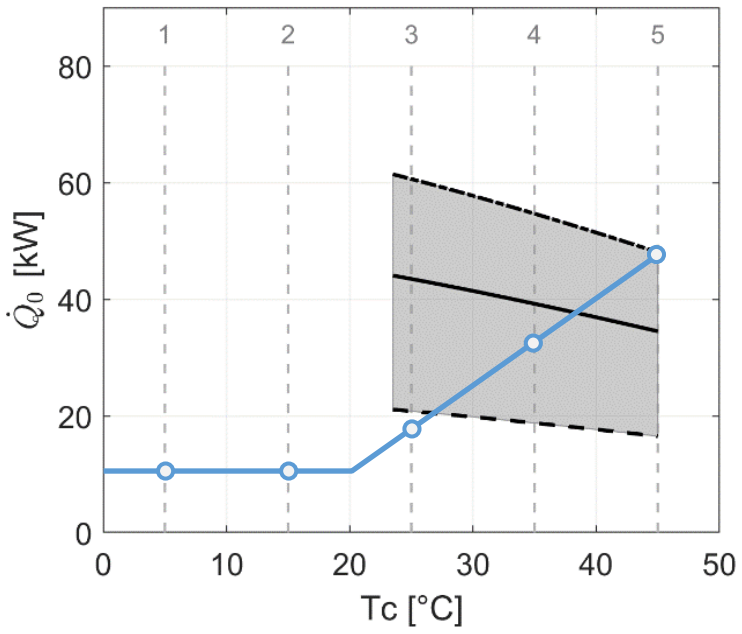


Abbildung 34 *- Kombination Lastprofil und Verdichterkennfeld*

3.1. Betriebsbedingungen

Für die Beschreibung der Zustandsänderung durch den Verdichter sind die Grössen Verdampfungstemperatur (T_0), Überhitzung (UH) sowie Verflüssigungstemperatur (T_c) relevant. Damit die Verdichterbauarten miteinander verglichen werden können, müssen gleiche Betriebsbedingungen betrachtet werden. In dieser Untersuchung werden als Betriebsbedingungen Umgebungstemperaturen und Lastprofile verwendet. Dies ist eine wichtige Unterscheidung, denn die effektiven Betriebspunkte der Verdichterbauarten bei gleichen Betriebsbedingungen können sich aufgrund von Einsatzgrenzen, Kältemittel, Betriebsart (sub- oder transkritisch) oder Kältekreis (Booster oder einstufig) unterscheiden.

Als Betriebsbedingungen werden 5 Referenz-Umgebungstemperaturen definiert, welche jeweils einen Bereich von Umgebungstemperaturen repräsentieren. Die Stundenhäufigkeit der einzelnen Umgebungstemperatur ist abhängig vom Standort bzw. Wetterdaten. Die Temperaturbereiche und Referenztemperaturen sind wie folgt definiert:

Tabelle 2 *- Zusammenfassung Temperaturbereiche und Referenz-Temperatur*

Betriebspunkt	Temperaturbereich		Referenz Temperatur
	min	max	
1	-20 °C	6 °C	1 °C
2	6 °C	15 °C	11 °C
3	15 °C	23 °C	19 °C
4	23 °C	31 °C	27 °C
5	31 °C	40 °C	35 °C

Die zweite wichtige Betriebsbedingung ist das Lastprofil. Wie in Kapitel «Lastprofile» bereits beschrieben, können Lastprofile aus variablen als auch konstanten Lastanteilen zusammengesetzt sein. Wir bezeichnen die variablen Anteile mit dem Begriff «Klimanutzung» und die konstanten mit dem Begriff «Prozessnutzung». Je nach Kälteanwendung werden unterschiedliche Lastprofile ausgewertet, diese sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 3 *- Zusammenfassung Lastprofile und Nutzungsarten*

Nutzung / Lastprofil	Kälteanwendung		
	Klimakälte	Pluskühlung	Minuskühlung
100% Klima, 0% Prozess	Ja	Nein	Nein
80% Klima, 20% Prozess	Ja	Nein	Nein
50% Klima, 50% Prozess	Nein	Ja	Ja
25% Klima, 75% Prozess	Ja	Ja	Ja
0% Klima, 100% Prozess	Ja	Nein	Nein

3.2. Betriebspunkte

In dieser Untersuchung werden Verdichter bei gleichen Umgebungstemperaturen und Lastprofilen verglichen. Die effektiven Betriebspunkte können sich je nach Bauart unterscheiden und werden aus den Betriebsbedingungen und dem Verdichterkennfeld bestimmt. Grundsätzlich kann der Betriebspunkt des Verdichters durch die Verdampfungs- und Verflüssigungstemperatur sowie die Überhitzung und benötigte Kälteleistung definiert werden. Lediglich bei CO2-Verdichtern sind aufgrund des transkritischen Betriebs und den möglichen Booster-Schaltungen weitere Angaben nötig. Die Spezialfälle werden zum Schluss separat beschrieben.

Verdampfungstemperatur T_0

Es werden drei Kälteanwendungen mit unterschiedlichen Verdampfungstemperaturen untersucht. Die Verdampfungstemperatur bleibt über alle fünf Betriebspunkte konstant und ist wie folgt definiert:

***Tabelle 4** - Zusammenfassung Verdampfungstemperaturen*

Kälteanwendung	Betriebspunkte 1	2	3	4	5
Klimakälte «mit Entfeuchtung, Teilentfeuchtung»	5 °C				
Pluskühlung «Gastro, Bäckereien»	-10 °C				
Minuskühlung	-30 °C				

Überhitzung UH

Für alle Betriebspunkte wird eine konstante Überhitzung angenommen, welche sich je nach Kältemittel unterscheiden kann. Bei Propan wurde die Überhitzung auf 20 K erhöht, bei allen anderen Kältemittel orientiert sich die Überhitzung an der EN 12900. Dies liegt an der Verfügbarkeit von Daten, welche lediglich mit der entsprechenden Überhitzung verfügbar sind.

***Tabelle 5** - Zusammenfassung Überhitzung*

Kältemittel	Betriebspunkte 1	2	3	4	5
R1234ze R454B R513A R744 (CO2) R449A	10 K				
R290 (Propan)	20 K				
R717 (Ammoniak)	5 K				

Verflüssigungstemperatur T_c

Die Verflüssigungstemperatur wird mittels Umgebungstemperatur und Verdichterkennfeld bzw. Einsatzgrenze definiert. Die theoretische Verflüssigungstemperatur wird aus der Umgebungstemperatur sowie einer Temperaturdifferenz über dem Verflüssiger bestimmt. Die Temperaturdifferenz zwischen Umgebungs- und Verflüssigungstemperatur ist betriebspunktabhängig und nimmt bei Teillast ab. Liegt die theoretische Verflüssigungstemperatur ausserhalb der Einsatzgrenzen der Verdichterbauart, wird der Wert entsprechend korrigiert. Die effektive Verflüssigungstemperatur kann somit je nach Verdichterbauart unterschiedlich sein.

***Tabelle 6** – Zusammenfassung Verflüssigungstemperaturen*

	Betriebspunkte				
	1	2	3	4	5
Umgebungstemperaturen	1 °C	11 °C	19 °C	27 °C	35 °C
Temperaturdifferenz Verflüssiger	4 K	4 K	6 K	8 K	10 K
Verflüssigungstemperatur "theoretisch"	5 °C	15 °C	25 °C	35 °C	45 °C
Einsatzgrenze Verdichter *(Beispiel)*	10 °C				
Verflüssigungstemperatur "effektiv"	10 °C	15 °C	25 °C	35 °C	45 °C

Kälteleistung $\dot{Q}_0$

Der Kältebedarf wird durch die Nennleistung (100%) und das Lastprofil definiert und variiert je nach Betriebspunkt. Die untersuchten Leistungsbereiche der Verdichterbauarten sind abhängig von der Kälteanwendung. Sie sind gemeinsam mit dem Einfluss des Lastprofils auf den Kältebedarf in den folgenden Tabellen zusammengefasst.

***Tabelle 7** - Übersicht Kälteleistung*

Kälteanwendung	Kälteleistung (100%)
Klimakälte «mit Entfeuchtung, Teilentfeuchtung»	20 / 50 / 100 / 300 kW
Pluskühlung «Gastro, Bäckereien»	2 / 10 / 50 / 100 kW
Minuskühlung	1 / 5 / 25 / 50 kW

***Tabelle 8** - Zusammenfassung Kältebedarf*

Lastprofil	Betriebspunkte				
	1	2	3	4	5
100% Klima, 0% Prozess	0 %	0 %	15.8 %	57.9 %	100 %
80% Klima, 20% Prozess	20 %	20 %	32.6 %	66.3 %	100 %
50% Klima, 50% Prozess	50 %	50 %	57.9 %	78.9 %	100 %
25% Klima, 75% Prozess	75 %	75 %	78.9 %	89.5 %	100 %
0% Klima, 100% Prozess	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

Durch die Wahl von Kälteanwendung und Kältemittel werden die Verdampfungstemperatur sowie die Überhitzung festgelegt. Aus der Kombination von Betriebsbedingungen und dem Verdichterkennfeld können die Verflüssigungstemperatur und Kälteleistung sowie COP und Betriebsart des Verdichters bestimmt werden. Dies ist in Abbildung 35 schematisch dargestellt.

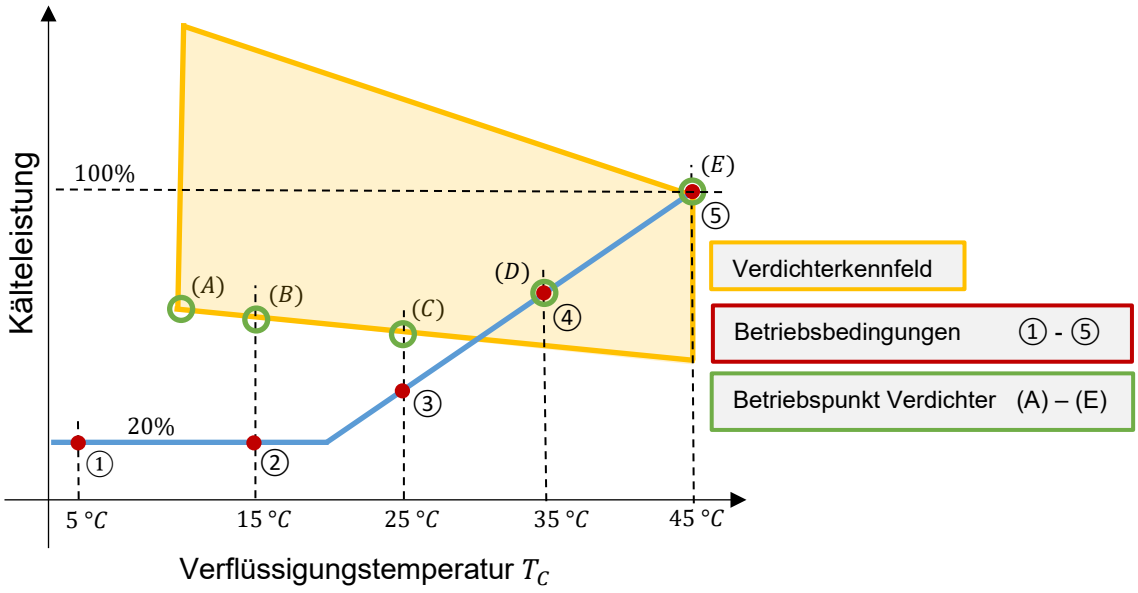


Abbildung 35 *- Betriebspunkte Verdichter*

(A) Sowohl Verflüssigungstemperatur als auch Kältebedarf der Betriebsbedingungen ① liegen ausserhalb des Verdichterkennfeldes. Die Verflüssigungstemperatur im Betriebspunkt (A) wird deshalb gemäss Einsatzgrenzen des Verdichters erhöht. Die Kälteleistung des Verdichters bei minimaler Frequenz ist grösser als der Kältebedarf. Kälteleistung und Kältebedarf stimmen nicht überein, der Verdichter ist im Taktbetrieb.

(B)+(C) Der Kältebedarf der Betriebsbedingungen ②+③ liegen ausserhalb des Verdichter-Kennfeldes. Die Kälteleistung des Verdichters bei minimaler Frequenz ist grösser als der Kältebedarf. Kälteleistung und Kältebedarf stimmen nicht überein, der Verdichter ist im Taktbetrieb.

(D)+(E) Der Kältebedarf der Betriebsbedingung ④+⑤ liegen innerhalb des Verdichter-kennfeldes. Der Verdichter kann die Kälteleistung an den Kältebedarf anpassen. Die Verdichter-Frequenz wird dem Kältebedarf entsprechend gewählt. Der Verdichter ist in Volllast oder moduliert.

Spezialfall CO2 – Klimakälte und Pluskühlung

Bei CO2-Verdichtern sind die letzten beiden Betriebspunkte im transkritischen Bereich. Die Wärmeabgabe im transkritischen Betrieb erfolgt nicht im Zweiphasengebiet des Kältemittels; zur Unterscheidung spricht man von Gaskühler anstelle von Verflüssiger. Der Hochdruck (p_{gk}) kann nicht mehr aus der Verflüssigungstemperatur bestimmt werden. Deshalb sind zur Definition von Punkt (3) im Kreisprozess Gaskühleraustrittstemperatur (T_{gka}) und Hochdruck notwendig. Die Unterschiede sind in der Abbildung 36 dargestellt.

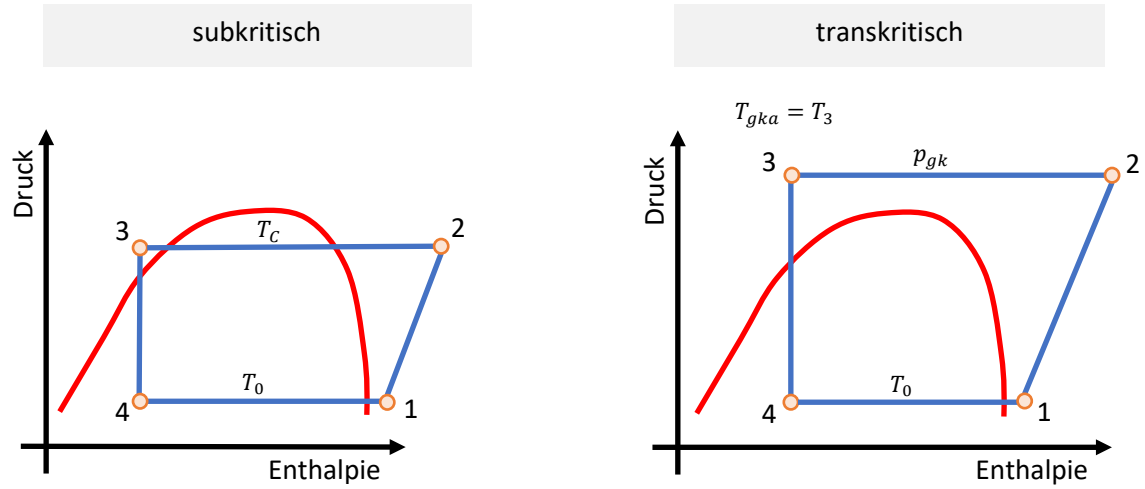


Abbildung 36 *- Vergleich sub- und transkritischer Kreisprozess*

Die subkritischen Betriebspunkte bei CO2 sind mit denen der anderen Kältemittel identisch. Aufgrund der besseren Wärmeübertragung im transkritischen Bereich können kleinere Temperaturdifferenzen zwischen Umgebungstemperatur und Gaskühleraustrittstemperatur (T_{gka}) erreicht werden. Der Hochdruck entspricht dem Mittelwert von angegebenen optimalen Hochdrücken verschiedener Hersteller bei der entsprechenden Gaskühleraustrittstemperatur. Die CO2-Betriebspunkte für Klimakälte und Pluskühlung sind in folgender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 9 *- Zusammenfassung CO2 (Klimakälte und Pluskühlung)*

	Betriebspunkte				
	1	2	3	4	5
Verdampfungstemperatur Klimakälte	5 °C				
Verdampfungstemperatur Pluskühlung	-10 °C				
Umgebungstemperaturen	1 °C	11 °C	19 °C	27 °C	35 °C
Temperaturdifferenz Gaskühler	4 K	4 K	6 K	3 K	2 K
Transkritisch					
Gaskühler-Austrittstemperatur T_{gka}	-	-	-	30 °C	37 °C
Hochdruck p_{gk}	-	-	-	75 bar	94 bar
Subkritisch					
Verflüssigungstemperatur theoretisch	5 °C	15 °C	25 °C	-	-

Spezialfall CO_2 – Minuskühlung

In der Minuskühlung sind bei CO_2 aufgrund der hohen Druckunterschiede lediglich Booster-Schaltungen möglich. In einer Booster-Schaltung wird der benötigte Druckhub auf zwei Verdichterstufen aufgeteilt, welche über den Mitteldruck gekoppelt sind. In Abbildung 37 sind die Unterschiede zwischen Minuskühlung einstufig und Minuskühlung Booster schematisch dargestellt.

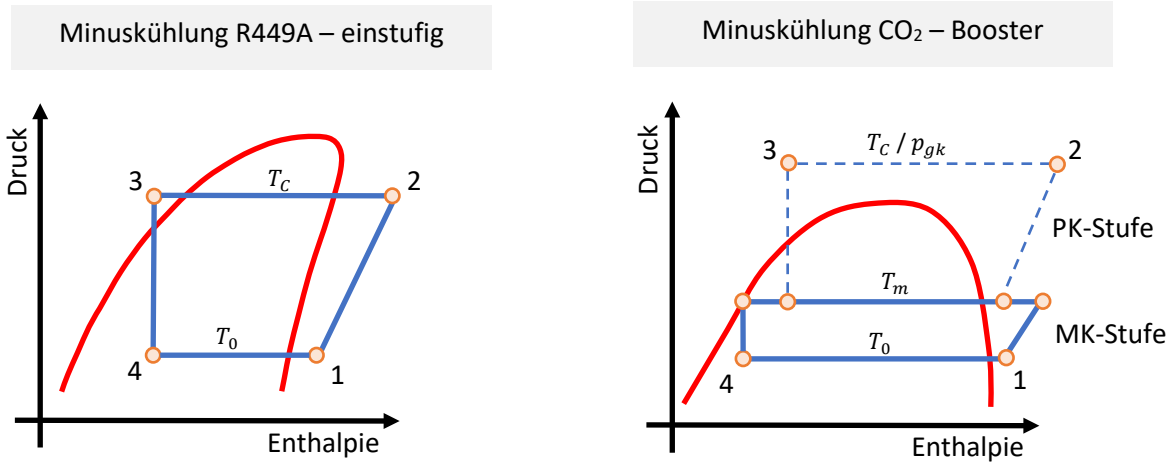


Abbildung 37 *- Vergleich Kreisprozess einstufig und Booster*

Bei der einstufigen Minuskühlung ist die Verdampfungstemperatur über alle Betriebspunkte konstant bei -30°C. Die Verflüssigungstemperatur ist über Temperaturdifferenzen im Verflüssiger an die Umgebungstemperatur gekoppelt. Bei einer Booster-Schaltung wird der Druckhub auf eine MK- und eine PK-Stufe aufgeteilt. Dabei ist die Verflüssigungstemperatur der PK-Stufe weiterhin an die Umgebung gekoppelt. Die Verdampfung der PK-Stufe erfolgt jedoch, wie bei der Pluskühlung, bei konstanten -10 °C. Somit entspricht die PK-Stufe einer klassischen CO2 Pluskühlung, welche sowohl subkritisch als auch transkritisch betrieben wird. Sowohl Verflüssigungs- als auch Verdampfungstemperatur der MK-Stufe sind konstant. Der Betriebspunkt des TK-Verdichters ist somit über alle Betriebsbedingungen identisch. Die CO2-Betriebspunkte für Minuskühlung sind in folgender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 10 *- Zusammenfassung CO2-Booster (Minuskühlung)*

	Betriebspunkte				
	1	2	3	4	5
Umgebungstemperaturen	1 °C	11 °C	19 °C	27 °C	35 °C
Temperaturdifferenz Gaskühler	4 K	4 K	6 K	3 K	2 K
PK-Stufe (sub- und transkritisch)					
Verdampfungstemperatur	-10 °C				
Verflüssigungstemperatur Theoretisch	5 °C	15 °C	25 °C	-	-
Gaskühler-Austrittstemperatur	-	-	-	30 °C	37 °C
Hochdruck p_{gk}	-	-	-	75 bar	94 bar
TK-Stufe					
Verdampfungstemperatur	-30 °C				
Verflüssigungstemperatur	-10 °C				

Die CO_2-Booster Schaltung kommt zum Einsatz, wenn sowohl Plus- als auch Minuskühlung vorhanden sind. Der Verdichter der MK-Stufe verdichtet den Massenstrom der MK-Stufe auf Mitteldruck. Der Verdichter der PK-Stufe muss anschliessend den Massenstrom beider Stufen bis auf Hochdruck verdichten. Für den Vergleich mit einer einstufigen Verdichtung muss die Leistungsaufnahme der PK-Stufe deshalb anteilsmässig aufgeteilt werden. Die Aufteilung erfolgt nach dem Verhältnis der beiden Massenströme.

$$f = \frac{\dot{m}_{MK}}{\dot{m}_{PK}} \tag{14}$$

$$COP = \frac{\dot{Q}_{0_{MK}}}{Pel_{MK} + f \cdot Pel_{PK}} \tag{15}$$

3.3. Gewichtungsfaktor

Die Gewichtung der einzelnen Betriebspunkte erfolgt gemäss energetischem Anteil am Jahresverbrauch. Der Energiebedarf ist abhängig von der anfallenden Kältelast sowie der Stundenhäufigkeit des Betriebspunktes.

$$\mathrm{w}_x = \frac{\sum_{x_{min}}^{x_{max}} (Stundenhäufigkeit_i * Last_i)}{\sum_{-20}^{40} (Stundenhäufigkeit_i * Last_i)} \tag{16}$$

Durch Aufsummieren des Energiebedarfes über alle Umgebungstemperaturen lässt sich der Jahresverbrauch berechnen. Jeder Betriebspunkt deckt einen Temperaturbereich von Umgebungstemperaturen ab, die Grenzen sind in Tabelle 11 zusammengefasst. Der Gewichtungsfaktor ist somit das Verhältnis des Energiebedarfs im jeweiligen Temperaturbereich zum Jahresverbrauch. Die Summe aller Gewichtungsfaktoren ist immer 1.

Tabelle 11 *- Temperaturbereich Gewichtungsfaktoren*

Gewichtungsfaktor	Temperaturbereich	
	min	max
w_1	-20 °C	6 °C
w_2	6 °C	15 °C
w_3	15 °C	23 °C
w_4	23 °C	31 °C
w_5	31 °C	40 °C

Die Gewichtungsfaktoren sind somit abhängig vom Lastprofil sowie dem Standort der Anlage. Der Einfluss der beiden Faktoren auf die Gewichtung der Betriebspunkte sind im Kapitel «5.4 Auswertung Gewichtungsfaktoren» genauer beschrieben.

3.4. Taktungsfaktor

Der Taktungsfaktor wird aus der Kombination von Lastprofil und Verdichterkennfeld bestimmt. Liegt der Kältebedarf innerhalb des Verdichterkennfeldes, kann der Verdichter modulieren und die Kälteleistung dem Kältebedarf anpassen. Ist der Kältebedarf kleiner als die minimale Kälteleistung, entspricht die Kälteleistung nicht dem Kältebedarf. Der Verdichter ist an diesem Betriebspunkt im Taktbetrieb. Dies ist in der Abbildung 38 schematisch dargestellt.

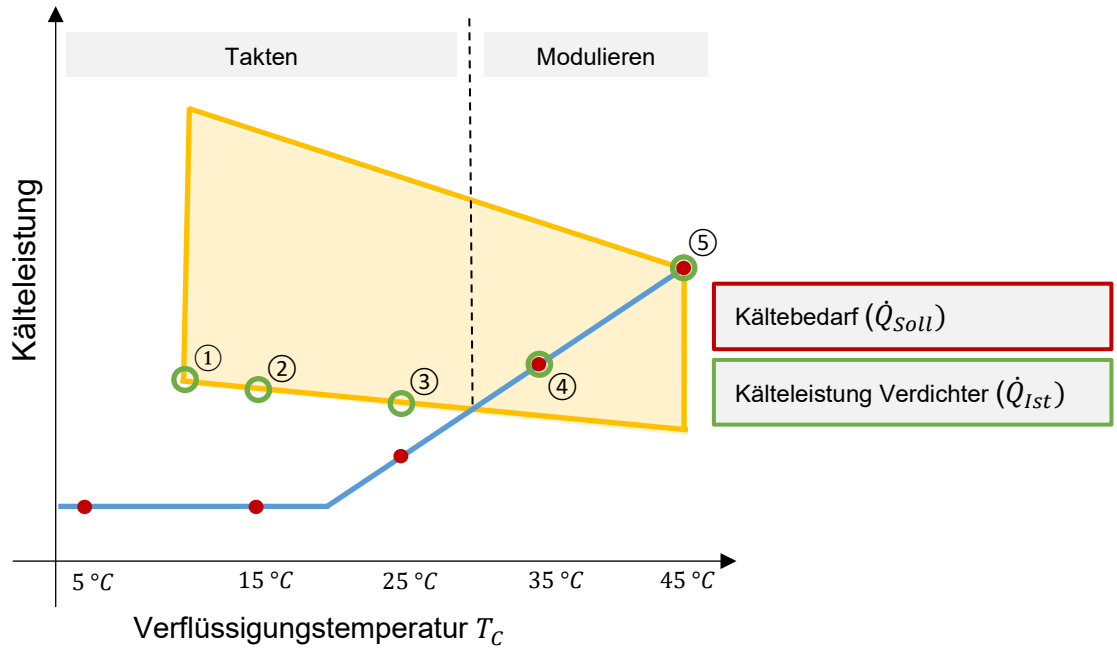


Abbildung 38 *- Betriebsart Verdichter*

Der Taktungsfaktor kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Je kleiner der Wert, desto stärker wird der COP am entsprechenden Betriebspunkt bestraft. Die Reduktion des COP ist abhängig von der Verdichterbauart und vom Unterschied zwischen Kältebedarf und Kälteleistung des Verdichters. Die Berechnung des Taktungsfaktors ist in der folgenden Gleichung beschrieben.

$$c_i = \frac{f_{Last}}{f_V * f_{Last} + (1 - f_V)} \qquad (17)$$

$$Wenn\ f_{Last} \geq 0.9\ dann\ c_i = 1$$

$$f_{Last} = \frac{\dot{Q}_{Soll}}{\dot{Q}_{Ist}} \qquad (18)$$

Minderungsfaktor f_V

Rollkolbenverdichter:	0.9
Scrollverdichter:	0.9
Hubkolbenverdichter:	0.9
Schraubenverdichter:	0.85
Turboverdichter	0.8

Je grösser der Unterschied zwischen Kältebedarf und Kälteleistung des Verdichters ist, desto kleiner wird der Lastfaktor f_{Last} und somit auch der Taktungsfaktor c_i. Der Einfluss der Betriebsart auf die Effizienz ist je nach Verdichterbauart unterschiedlich. Turboverdichter arbeiten bei sehr hohen Rotationsgeschwindigkeiten und haben deshalb Ein- und Ausschaltroutinen. Die unterschiedlichen Minderungsfaktoren sollen diesen Unterschieden Rechnung tragen. Die Werte wurden in Zusammenarbeit mit den Experten definiert und basieren auf keinen wissenschaftlichen Kriterien.

4. Resultate

In dieser Untersuchung wurden herstellerneutrale Verdichterkennfelder für unterschiedliche Verdichterbauarten, Kältemittel und Baugrössen sowie eine Bewertungsmethodik erarbeitet. Die hohe Anzahl von möglichen Kombinationen führt zu sehr vielen Resultaten, welche über das Verdichter-Tool effizient nach eigenem Bedarf gefiltert werden können.

Im Grundlagenbericht werden einzelne Verdichterkennfelder verglichen und interpretiert. Zudem wird der Einfluss von Standort und Lastprofil auf die energetische Gewichtung der Betriebspunkte aufgezeigt. Die gleichen Diagramme sind auch für andere Selektionen verfügbar und im Anhang ersichtlich. Bei Verdichter ohne Leistungsregelung ist das Kennfeld eine Kurve. Diese Verdichter werden durch die Taktungsfaktoren entsprechend stark bestraft. Teilweise sind für Verdichter Leistungsregelungen möglich, es sind jedoch keine Verdichterdaten verfügbar. Diese Leistungs-regelungen können daher nicht abgebildet werden, entsprechende Verdichter haben als Verdichterkennfeld ebenfalls eine Linie.

4.1. Verdichterkennfelder – Konzeptionelle Überlegungen

Bei der Planung einer Kältemaschine stehen unterschiedliche konzeptionelle Überlegungen im Vordergrund. Diese haben einen deutlich grösseren Einfluss auf die Effizienz der Kältemaschine als die Verdichterbauart. Um den Einfluss konzeptioneller Überlegungen abschätzen zu können, sind die Verdichterkennfelder ein nützliches Hilfsmittel.

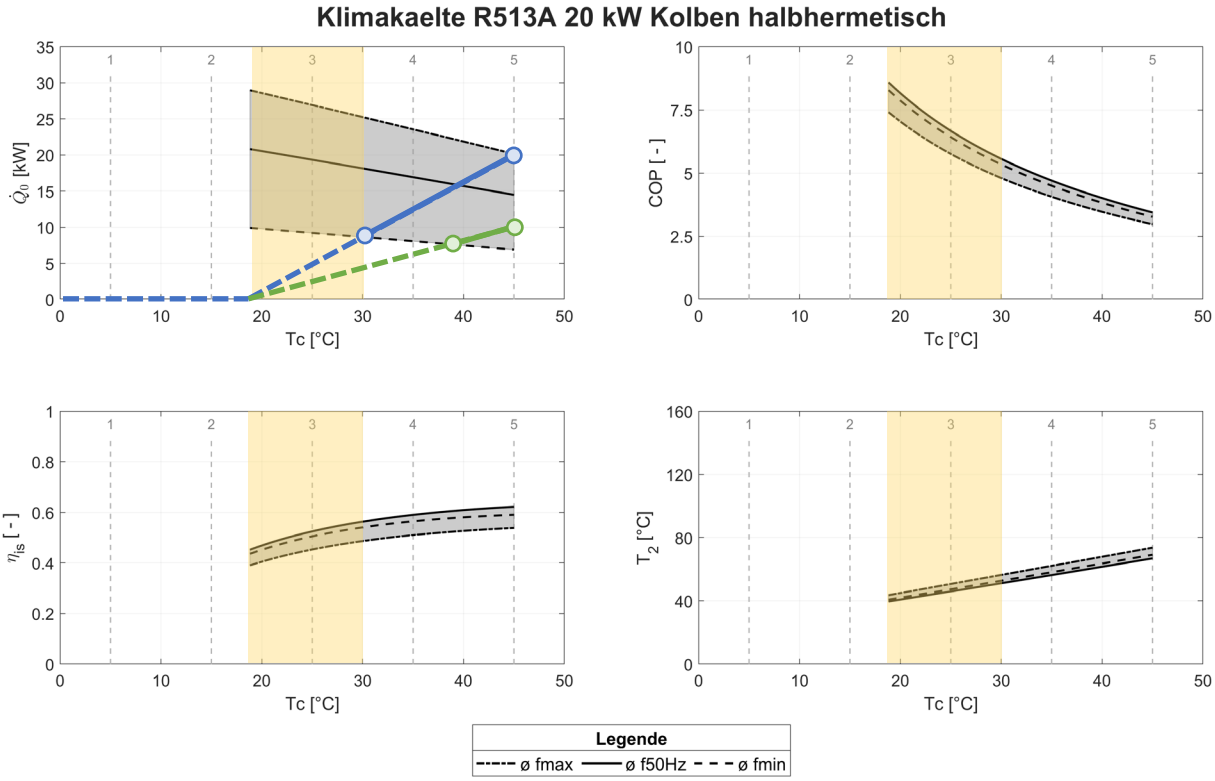


Abbildung 39 *- Konzeptionelle Überlegungen im Verdichterkennfeld*

In der Abbildung 39 sind verschiedene konzeptionelle Überlegungen sowie deren Einfluss auf den Betrieb der Anlage eingezeichnet. Wie in Kapitel «Betriebsstunden» bereits beschrieben, wird die Anlageneinsatzgrenze durch die restriktivste Komponente im Kältekreis definiert. Sind die Komponenten, z.B. das Expansionsventil, ungenügend aufeinander abgestimmt, wird das Potential des Verdichters stark eingeschränkt. Falls die Anlageneinsatzgrenze z.B. bei T_C = 30 °C liegt, kann der gelb markierte Bereich, indem die Effizienz des Verdichters deutlich zunimmt, überhaupt nicht genutzt werden. Der Einfluss einer Überdimensionierung kann im Verdichterkennfeld ebenfalls sehr schön gezeigt werden. Die baue Linie zeigt ein stark variables Lastprofil, welches am Auslegungspunkt mit dem Verdichterkennefeld übereinstimmt. Der Verdichter ist für diese Anwendung optimal dimensioniert. Die grüne Linie zeigt den Einfluss einer Überdimensionierung um 50%. Der Kältebedarf ist deutlich kleiner als bei der Auslegung des Verdichters angenommen, entsprechend ist der Verdichter und somit auch das Verdichterkennfeld völlig überdimensioniert. Eine solche Anlage wird trotz Leistungsregelung während sehr vielen Betriebsstunden Takten. Selbst bei einer guten Dimensionierung des Verdichters kommt die Leistungsregelung bei stark variablen Lastprofilen an ihre Grenzen. Ein Parallelverbund, welche den Kältebedarf auf mehrere Verdichter verteilt, ist für solche Anwendungen deutlich besser geeignet.

4.2. Verdichterkennfelder – Vergleich Verdichtungsprinzipien

Wie in Kapitel «Verdichterbauarten» bereits beschrieben, wird bei den Verdichterbauarten primär zwischen Verdrängungs- und Strömungsmaschinen unterschieden. Ein Vergleich zwischen diesen beiden Verdichtungsprinzipien ist in der Abbildung 40 dargestellt. Zu beachten ist, dass die Daten der Turboverdichter lediglich auf 13 Stützstellen und nicht Verdichter-Polynomen basieren.

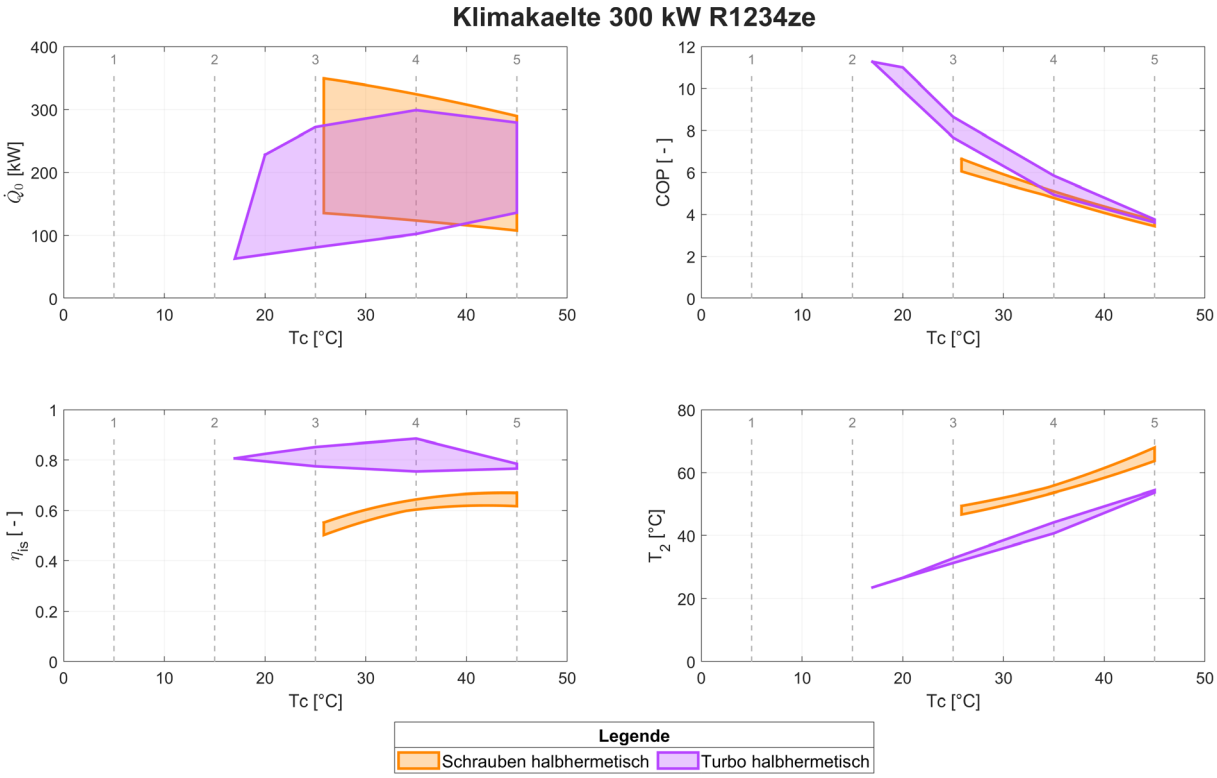


Abbildung 40 *- Vergleich Verdichtungsprinzipien*

Wie stark sich die Verdichtungsprinzipien unterscheiden, wird beim Vergleichen der Kälteleistung ersichtlich. Bei Verdrängungsverdichter nimmt die Kälteleistung bei sinkender Verflüssigungstemperaur zu. Durch Reduktion der Drehzahl kann die Kälteleistung auf bis zu 40-50% reduziert werden, der Regelbereich verringert sich jedoch bei sinkender Verflüssigungstemperatur. Bei Strömungsmaschinen reduziert sich aufgrund der Schluckgrenze die maximale Kälteleistung bei sinkender Verflüssigungstemperatur. Dies ist insbesondere bei Anwendungen mit hohem Prozessanteil zu beachten. Interessant ist jedoch der Regelbereich der Turboverdichter bei tiefen Verflüssigungstemperaturen. Je tiefer die Verflüssigungstemperatur, desto stärker kann die Kälteleistung reduziert werden. Bei Lastprofilen mit hohem variablem Anteil kann der Strömungsverdichter somit deutlich besser die Kälteleistung modulieren.

Der COP der Turboverdichter ist insbesondere bei tiefen Verflüssigungstemperaturen deutlich besser. Zum einen hat der Turboverdichter einen sehr konstanten und hohen isentropen Verdichter-Wirkungsgrad. Bei sehr tiefen Verflüssigungstemperaturen wirkt sich zudem der grössere Einsatzbereich des Turboverdichters sehr prositiv aus. Bei der Planung von Turboverdichtern ist besonders darauf zu achten, dass diese nicht Takten. Die sehr aufwändigen Ein- und Auschaltroutinen sind in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt.

4.3. Verdichterkennfelder – Vergleich Verdichterbauarten

Die Charakteristik der Verdichterbauarten ist stark auf die konstruktiven Eigenheiten zurückzuführen. In der Abbildung 41 werden exemplarisch Kennfelder unterschiedlicher Verdrängungs-verdichter miteinander verglichen. Zu beachten ist, dass sich das Verhalten der Verdichter je nach Kältemittel und Baugrössen verändert. Die Interpretation ist deshalb nicht für alle untersuchten Fälle zutreffend. Die Diagramme der restlichen Selektionen sind im Anhang ersichtlich.

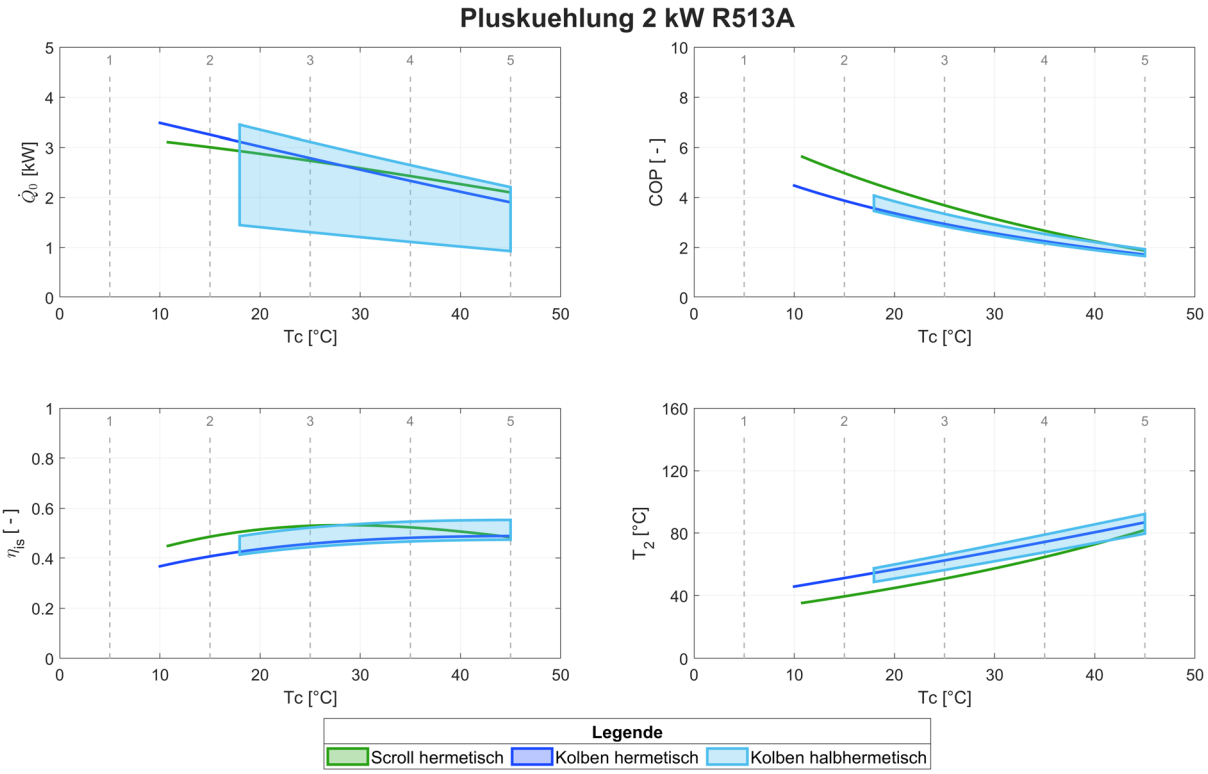


Abbildung 41 *- Vergleich Verdichterbauarten*

In dieser Selektion werden Verdichterbauarten in der Anwendung Pluskühlung verglichen. Aufgrund der ausgewählten kleinen Kälteleistung sind keine Turbo- oder Schraubenverdichter verfügbar. Die hermetischen Kolben- und Scrollverdichter verfügen über keine Leistungsregelung, das Verdichterkennfeld fällt daher in eine Kurve zusammen. Diese Verdichter werden durch die Taktungsfaktoren entsprechend bestraft. Wie in Kapitel «Hubkolbenverdichter» bereits beschrieben haben die Arbeitsventile der Hubkolbenverdichter einen starken Einfluss auf deren Charakteristik. Dies ist am Verlauf der Kälteleistung sehr gut ersichtlich. Im Auslegungspunkt ist die Kälteleistung des Hubkolbenverdichters und des Scrollverdichters nahezu identisch. Wird die Verflüssigungstemperatur reduziert, steigt die Kälteleistung des Hubkolbenverdichters im Vergleich zum Scrollverdichter deutlich stärker an. Dies ist auf den Schadraum des Kolbenverdichters und die daraus resultierende Rückexpansion zurückzuführen. Aufgrund des Schadraumes ist der Liefergrad beim Kolbenverdichter bei hohen Druckverhältnissen schlecht, verbessert sich aber mit sinkender Verflüssigungstemperatur. Deshalb steigen Massenstrom und somit auch Kälteleistung bei tiefen Verflüssigungstemperaturen überpropotional stark an. Besonders charakteristisch für das Verhalten des Scrollverdichters ist das interne Druckverhältnis. Dies ist am Verlauf des isentropen Verdichterwirkungsgrades ersichtlich.

Stimmen Druckverhältnis der Anlage und das interne Druckverhältnis des Verdichters überein, werden sehr gute Wirkungsgrade erzielt. Wird der Verdichter an einem anderen Druckverhältnis betrieben, reduziert sich der Wirkungsgrad zunehmend. Bei der Auswahl des Scrollverdichters ist daher darauf zu achten, dass das interne Druckverhältnis an einem energetisch relevanten Betriebspunkt liegt. Hierzu sind die Resultate der Gewichtungsfaktoren, Kapitel «5.4 Auswertung Gewichtungsfaktoren», hilfreich.

4.4. Verdichterkennfelder – Vergleich Baugrössen

Die Eigenschaften der Verdichterbauarten können sich je nach Hersteller und Baugrösse unterscheiden. In Abbildung 42 werden verschiedene Baugrössen von Hubkolben-verdichter in der Minuskühlung verglichen.

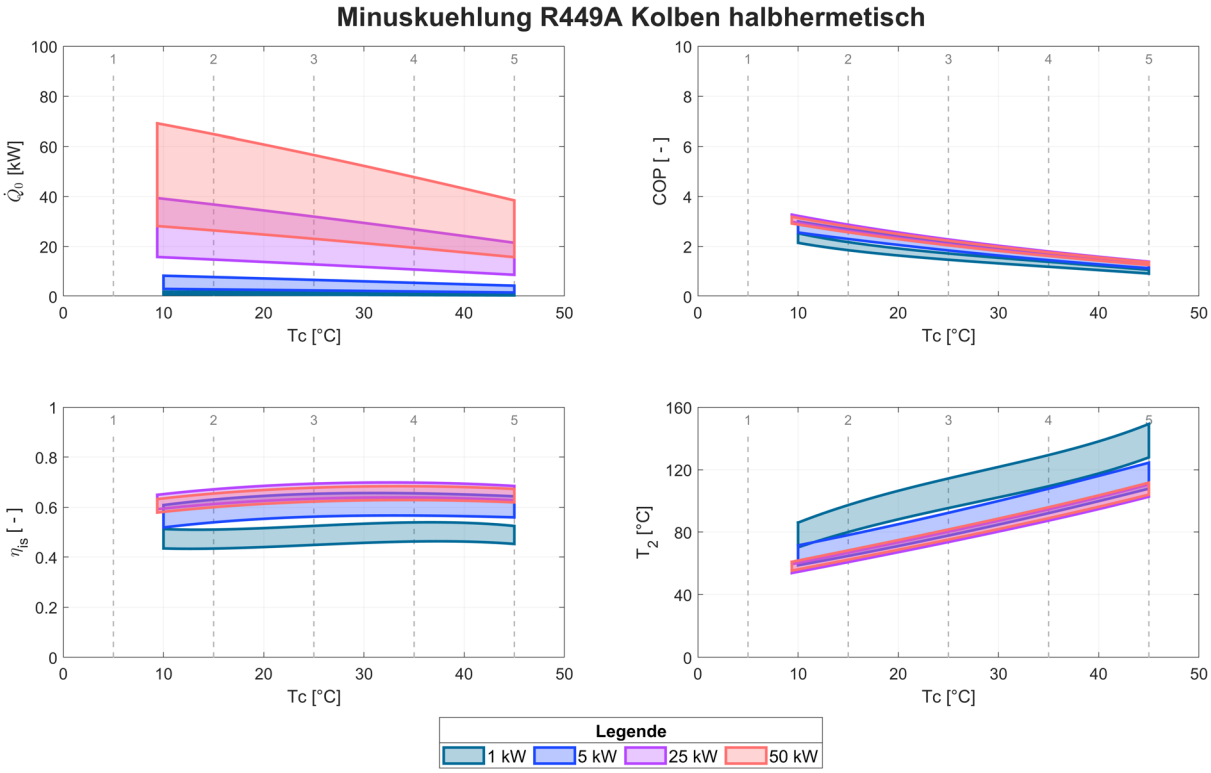


Abbildung 42 *- Vergleich Baugrössen*

In dieser Selektion werden unterschiedliche Baugrössen von Hubkolbenverdichter verglichen. Die Anwendung und das Kältemittel sind für alle Verdichter identisch. Der Verlauf des Isentropen Verdichterwirkungsgrades zeigt somit sehr schön dessen Unterschiede. Je grösser die Baugrösse, desto besser ist auch der isentrope Verdichterwirkungsgrad. Ein schlechterer Isentropen Verdichter-wirkungsgrad reduziert aber nicht nur den COP, er erhöht auch die Endverdichtungstemperatur. Dies ist insbesondere bei Anwendungen mit grossem Druckverhältnis und Kältemittel mit hohem Isentropenexponenten problematisch. Dies ist am Verlauf der Temperatur T2 sehr schön ersichtlich. Die kleinen Baugrössen sind weniger effizient und haben daher bei hohen Verflüssigungstemperaturen sehr hohe Austrittstemperaturen. Diese Verdichter können nicht ohne zusätzliche Kühlung an diesem Arbeitspunkten betrieben werden. Der negative Einfluss einer externen Kühlung wird in der Untersuchung nicht berücksichtigt.

4.5. Verdichterkennfelder – Vergleich Kältemittel

Aufgrund der thermodynamischen Eigenschaften der Kältemittel gibt es trotz gleicher Verdichterbauart grosse Unterschiede. In den Verdichterkennfeldern wird das Verhalten der Verdichterbauarten bei unterschiedlichen Verflüssigungstemperaturen aufgezeigt. Die unterschiedlichen Verflüssigungsdrücke führen jedoch zu anderen Druckverhältnissen und Einsatzgrenzen. Dies ist in der Abbildung 43 exemplarisch dargestellt.

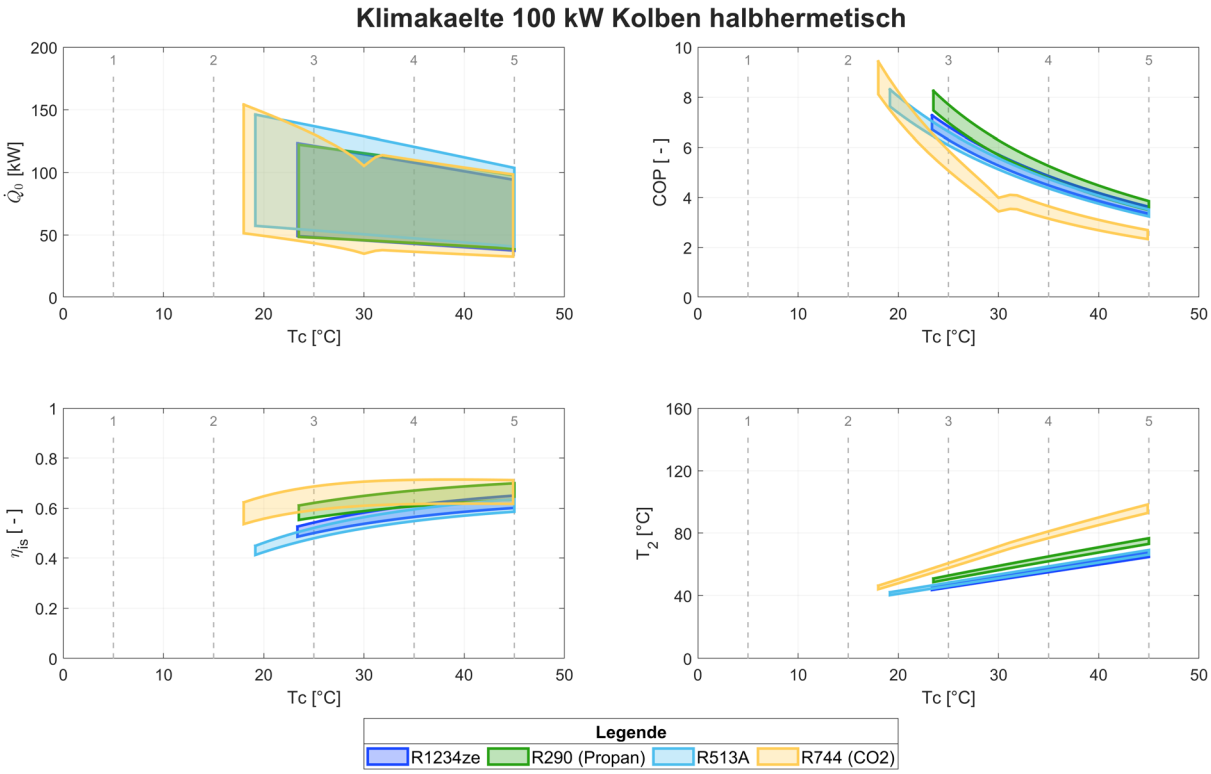


Abbildung 43 *- Vergleich Kältemittel*

Wie in Kapitel «4.2 Betriebspunkte» beschrieben, werden die CO2-Verdichter sowohl sub- als auch transkritisch betrieben. Der Übergang der Betriebsart führt im Verlauf von Kälteleistung und COP zu einem Knick. Bei den CO2-Verdichtern ist auffällig, dass sie trotz sehr gutem isentropen Verdichterwirkungsgrad beim COP, insbesondere im transkritischen Bereich, schlechter abschneiden. Dies liegt an der grossen Druckdifferenz zwischen Verdampfung und Verflüssigung. Durch den Einsatz von Parallelverdichtern und Ejektoren kann die Effizienz von CO2-Anlagen weiter gesteigert werden, dies ist jedoch nicht der Fokus dieser Untersuchung. Die Unterschiede der anderen Kältemittel sind deutlich geringer, wobei Propan in dieser Selektion über den ganzen Einsatzbereich den besten COP aufweist. Zu beachten sind zudem die unterschiedlichen Einsatzgrenzen je nach Kältemittel. Insbesondere bei Lastprofilen mit hohem Prozessanteil werden die ersten beiden Betriebspunkte energetisch relevanter. Verdichter mit CO2 oder R513A können bei tieferen Verflüssigungstemperaturen betrieben werden, wodurch sich der COP bei den ersten beiden Betriebspunkte deutlich verbessert.

4.6. Auswertung Gewichtungsfaktoren

Wie in Kapitel «4 Energetische Bewertung - aCOP» bereits beschrieben, ist die energetische Gewichtung der Betriebspunkte abhängig vom Lastprofil und Standort der Anlage. In der Abbildung 44 ist das Zusammenspiel von Stundenhäufigkeiten von Umgebungstemperatur und Lastprofil sowie deren Einfluss auf den Gewichtungsfaktor der einzelnen Betriebspunkte ersichtlich.

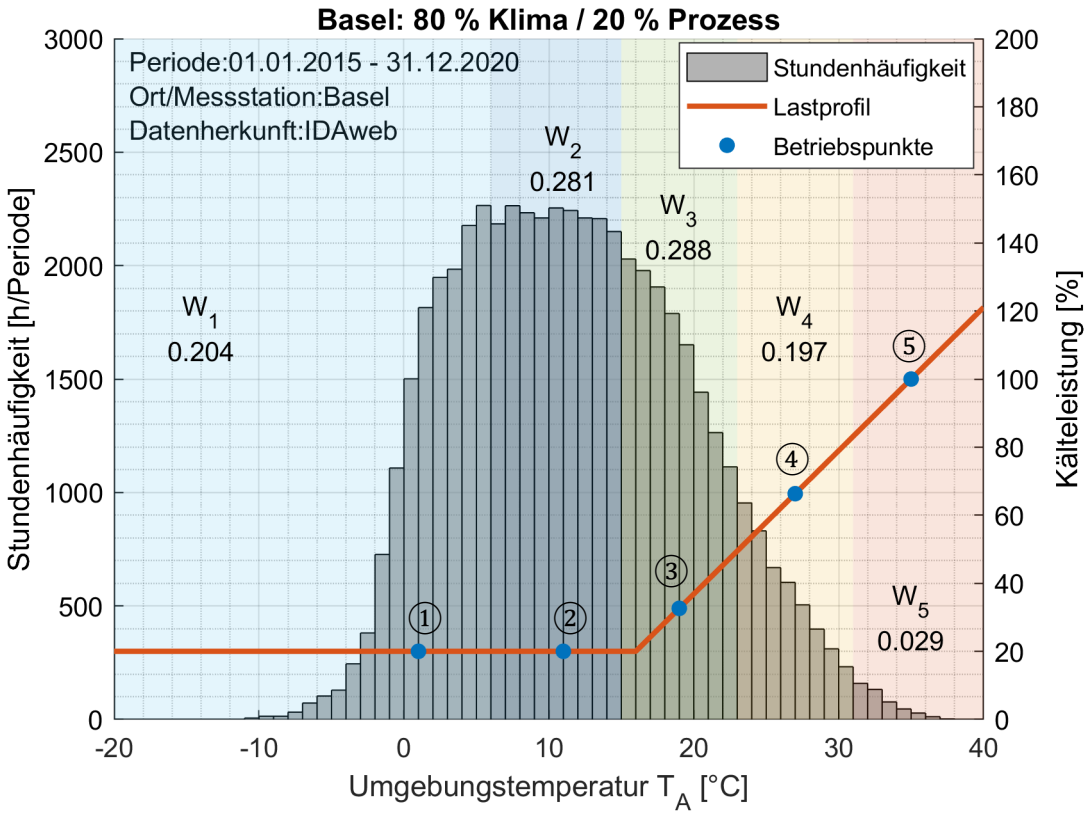


***Abbildung 44** - aCOP Basel mit 20% konstantem Lastanteil*

In der Abbildung 44 wird eine Anlage in Basel mit einem 20 % konstanten Lastanteil über das ganze Jahr dargestellt. Die untersuchten Betriebspunkte an den Referenztemperaturen sind als blaue Punkte eingetragen. Der Bereich von Umgebungstemperaturen, welcher durch den Betriebspunkt abgedeckt wird, ist farblich markiert. Es ist sehr gut ersichtlich, dass der Auslegungspunkt (Punkt 5) nur sehr wenige Betriebsstunden aufweist. Deutlich häufiger läuft die Anlage in Teillast an den ersten beiden Betriebspunkten. Der energetische Anteil der einzelnen Betriebspunkte am Jahresbedarf ist durch die Gewichtungsfaktoren (w_i) ersichtlich. Die ersten beiden Betriebspunkte haben mit 20.4 % bzw. 28.1 % einen grossen Anteil am Jahresverbrauch und sind für die energetische Bewertung der Anlage relevant. Den grössten Anteil hat jedoch der dritte Betriebspunkt mit 28.8 %. Dieser Betriebspunkt hat zwar deutlich weniger Betriebsstunden als die ersten beiden, aufgrund des grösseren Kältebedarfs ist dessen Anteil trotzdem grösser.

Die Gewichtungsfaktoren werden durch die beiden Variablen Lastprofil und Standort beeinflusst. Der Einfluss der beiden Variablen ist in den folgenden beiden Diagrammen ersichtlich.

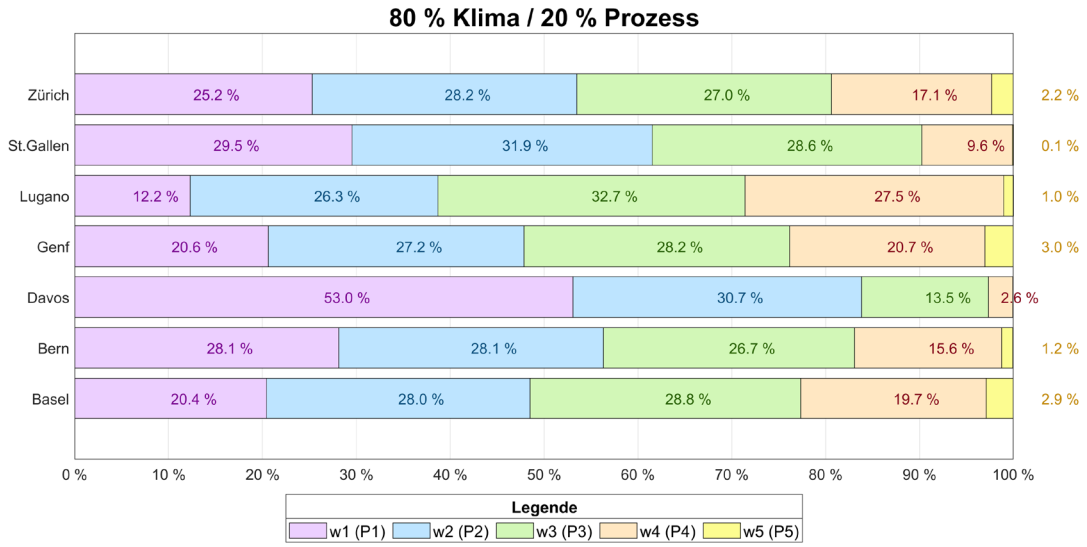


Abbildung 45 *- Einfluss Standort auf Gewichtungsfaktoren*

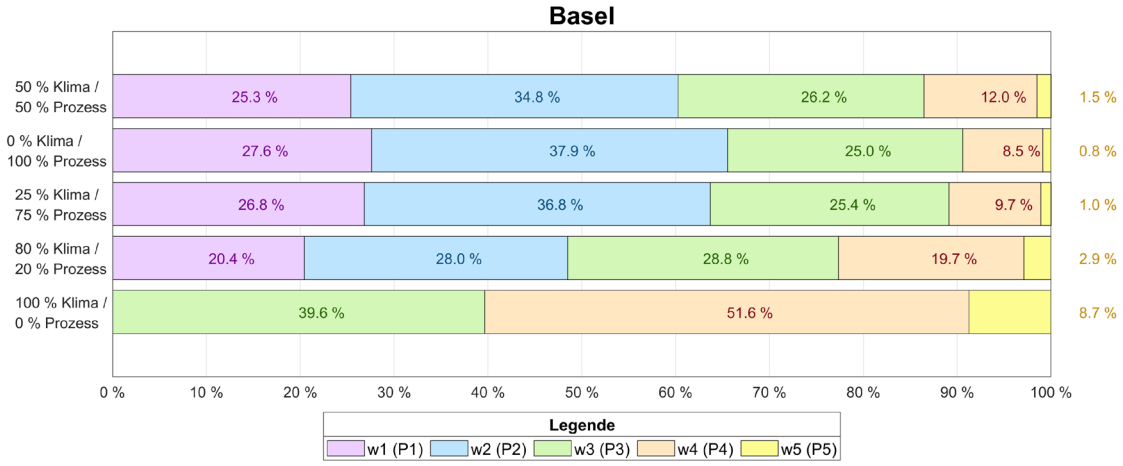


Abbildung 46 *- Einfluss Lastprofil auf Gewichtungsfaktoren*

In der Abbildung 45 ist der Einfluss des Standortes auf die Verteilung der Gewichtung ersichtlich. Das Lastprofil ist für alle Standorte identisch. Die unterschiedlichen Stundenhäufigkeiten von Umgebungstemperaturen der verschiedenen Standorte haben einen sehr grossen Einfluss auf die Gewichtungsfaktoren. In Lugano haben die ersten beiden Betriebspunkte lediglich einen energetischen Anteil von 38.5 %. Wird die gleiche Anlage in Davos betrieben, liegt deren Anteil bei 83.7 %. In der Abbildung 46 wird bei einem konstanten Standort das Lastprofil verändert. Wird die Anlage ohne konstanten Lastanteil über das ganze Jahr betrieben, haben die ersten beiden Betriebspunkte keinen Einfluss. Der Gewichtungsfaktor wird Null, da kein Kältebedarf besteht. Sobald die Anlage mit einem konstanten Lastanteil über das ganze Jahr betrieben wird, verändern sich die Gewichtungen deutlich. Wird hingegen der Prozess-Anteil von 20 % auf 80 % erhöht, verschieben sich die Gewichtungen nur geringfügig. Die Unterschiede im aCOP dieser beiden Lastprofile kommt daher primär aus den Taktungsfaktoren.

5. Literatur

[1] Hans Dieter Baehr and Stephan Kabelac. Thermodynamik. Springer, Berlin Heidelberg, 2012.

[2] Arnold Brunner, Michael Kriegers, Vladimir Prochaska and Frank Tillenkamp, Klimakälte heute. Faktor, Zürich, 2019.

[3] Hermann Recknagel, Eberhard Sprenger, Ernst-Rudolf Schramek. Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. Oldenbourg Industrieverlag GmbH, München, 2009.

[4] Klaus Reisner and Timo Reisner. Fachwissen Kältetechnik. VDE Verlag GmbH, Berlin, 2016.

[5] Klaus J. Lambers, Jürgen Süss and Jürgen Köhler. Der Verdichtungsprozess von Verdrängungsverdichtern. Teil III: Kennzahlen von Verdrängungsverdichtern. KI – Kälte Luft Klimatechnik. Ausgabe Dezember 2007, S.18-23.

[6] Peter Roth. Einsparung auf der Hochdruckseite einer Kälteanlage, Allgemeine Hinweise für Planer und Betreiber. KI – Kälte Luft Klimatechnik. Ausgabe März 2008, S.30-35.

[7] Grundlagen der Kältetechnik. Bitzer, Sindelfingen, 2021. «A-800-1»

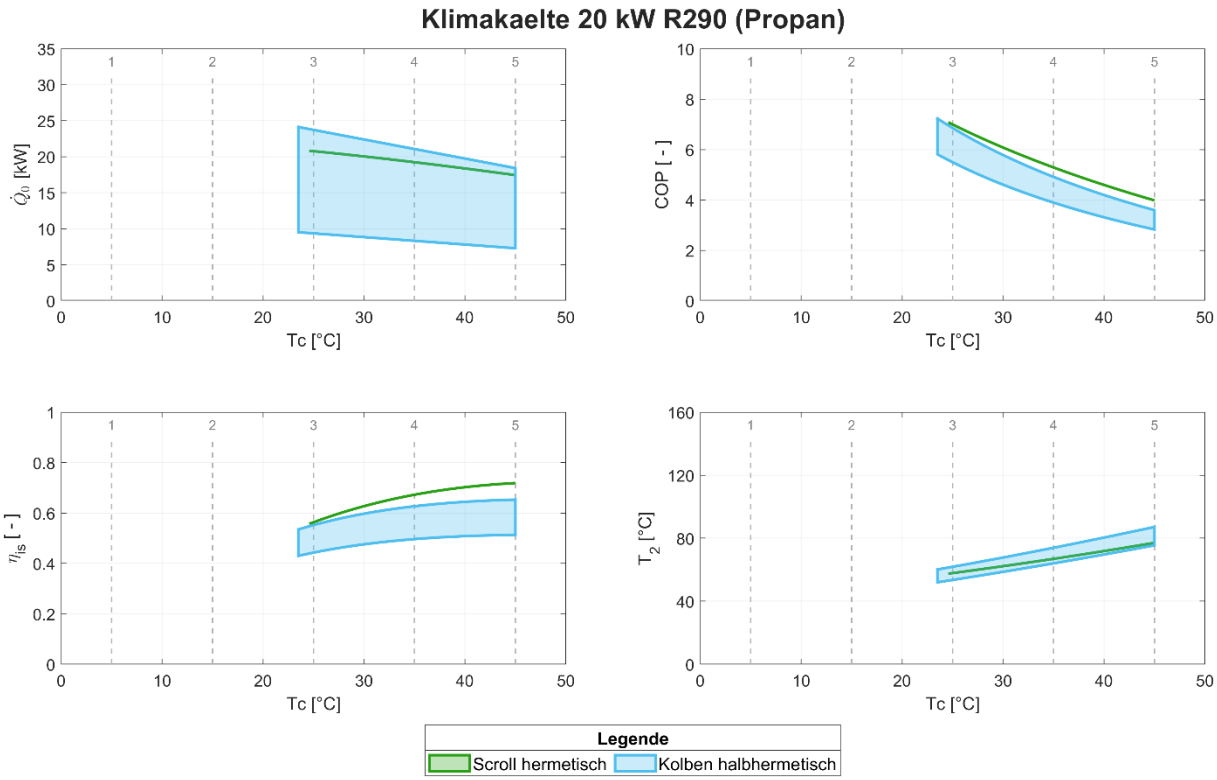
[8] Kolbenfibel. Bitzer, Sindelfingen, 2014. «A-220-1»

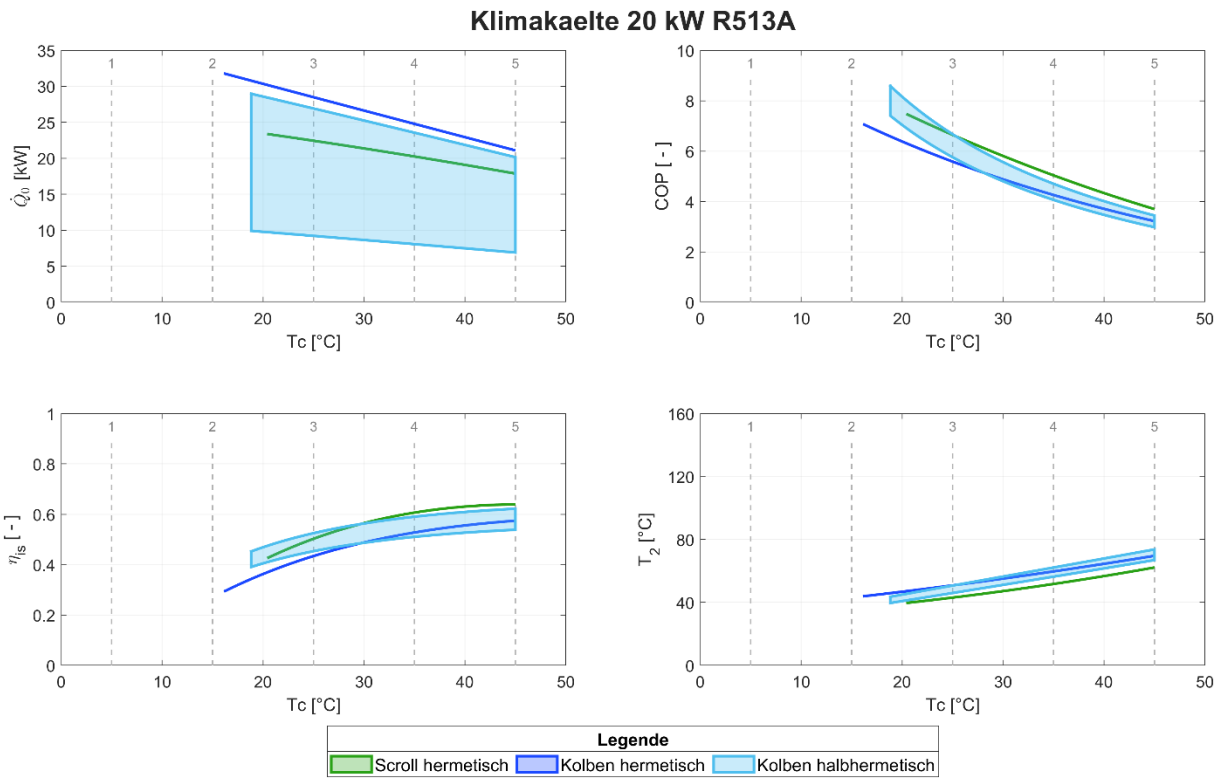
[9] Energie Schweiz. Verdichter-Tool BFE, unter: www.energieschweiz.ch

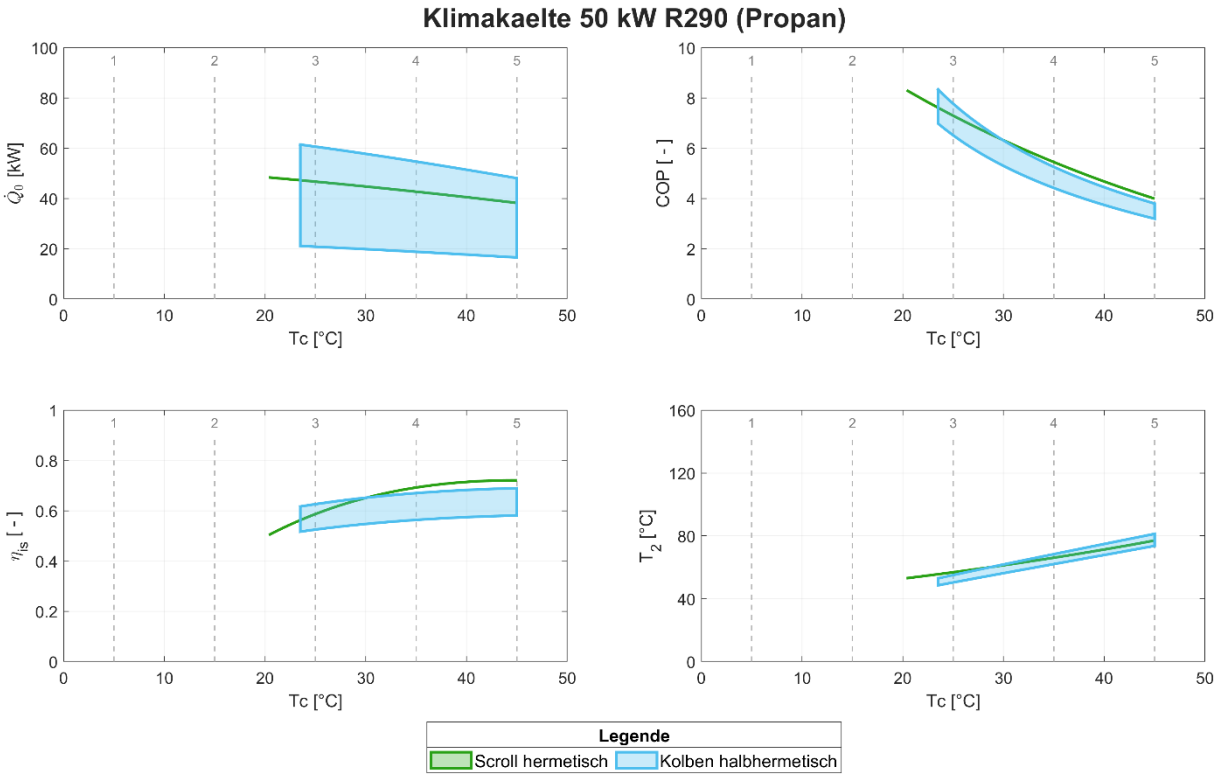
A. Anhang – Vergleich Verdichterkennfelder

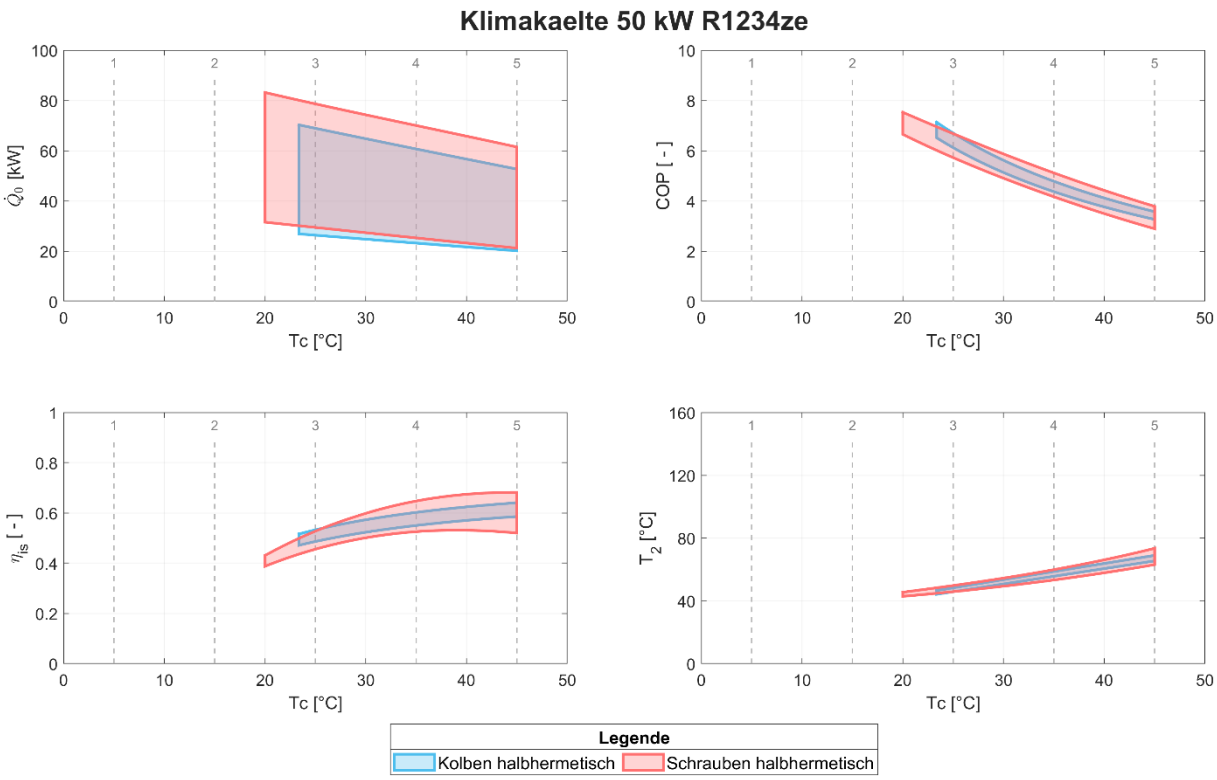
A.1 Vergleich Verdichterbauarten

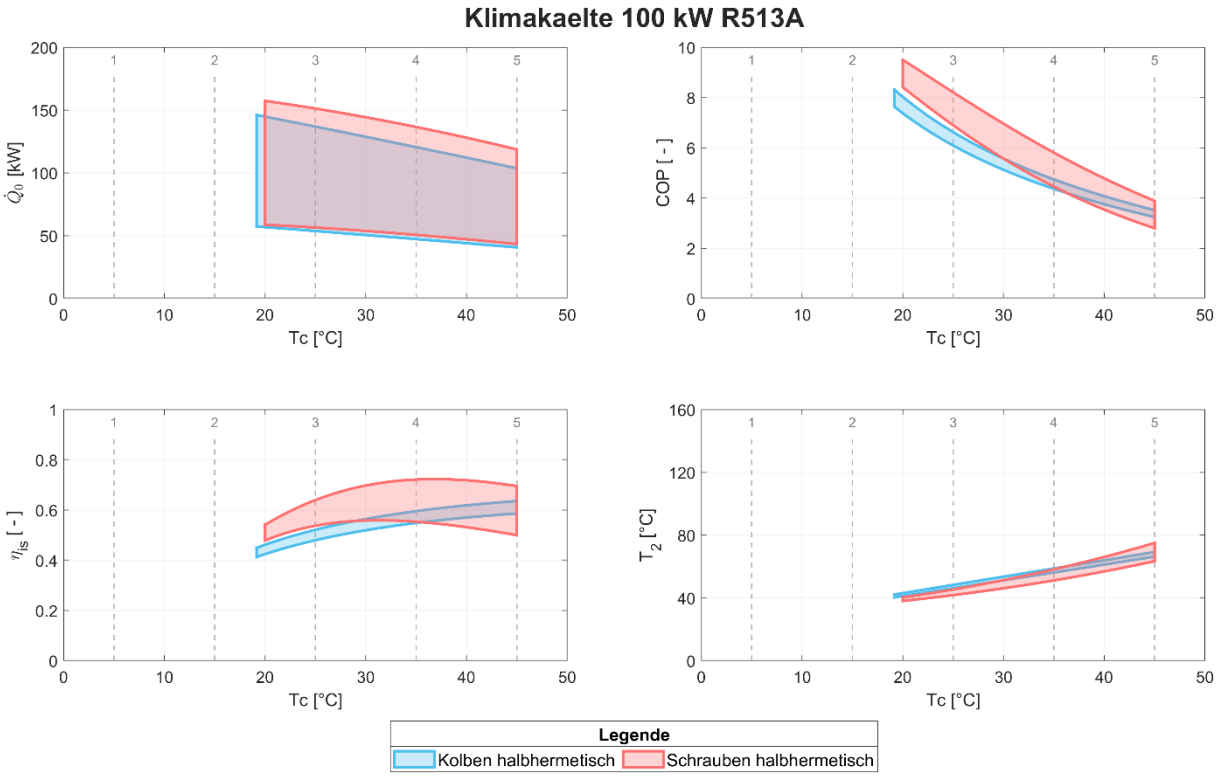
A.1.1 Vergleich Verdichterbauarten - Klimakälte

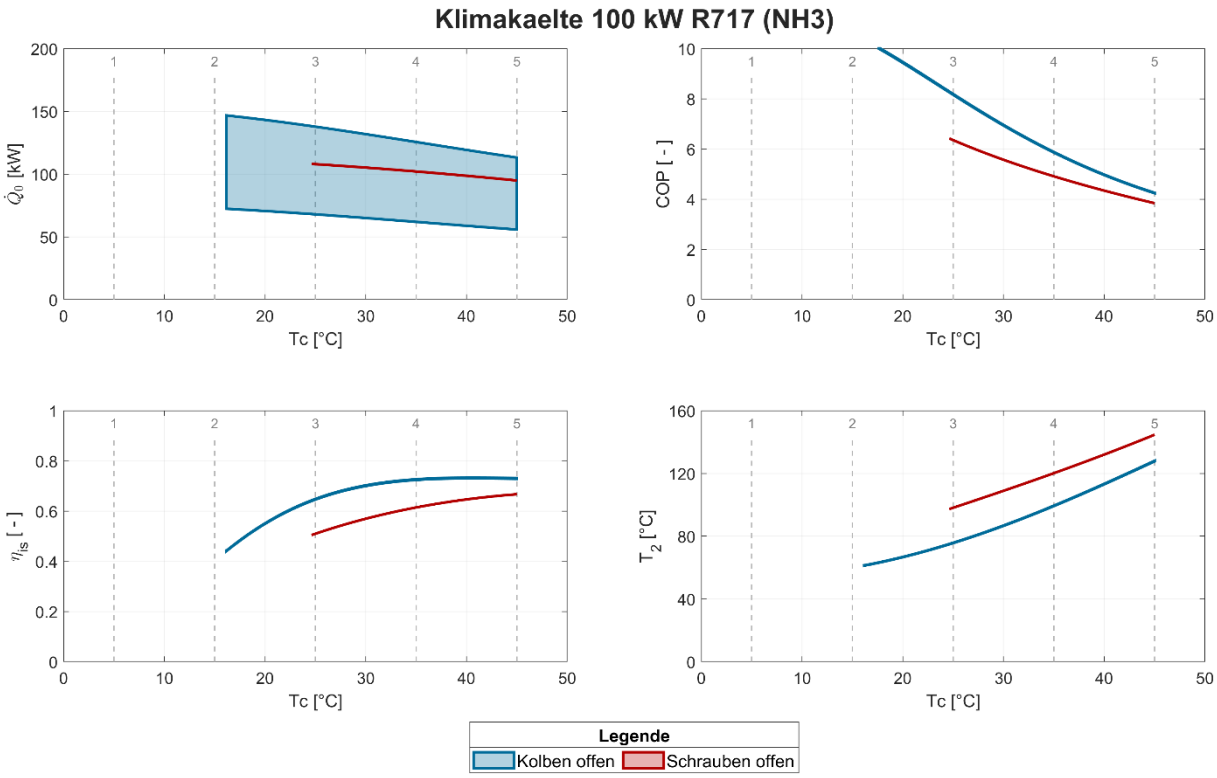


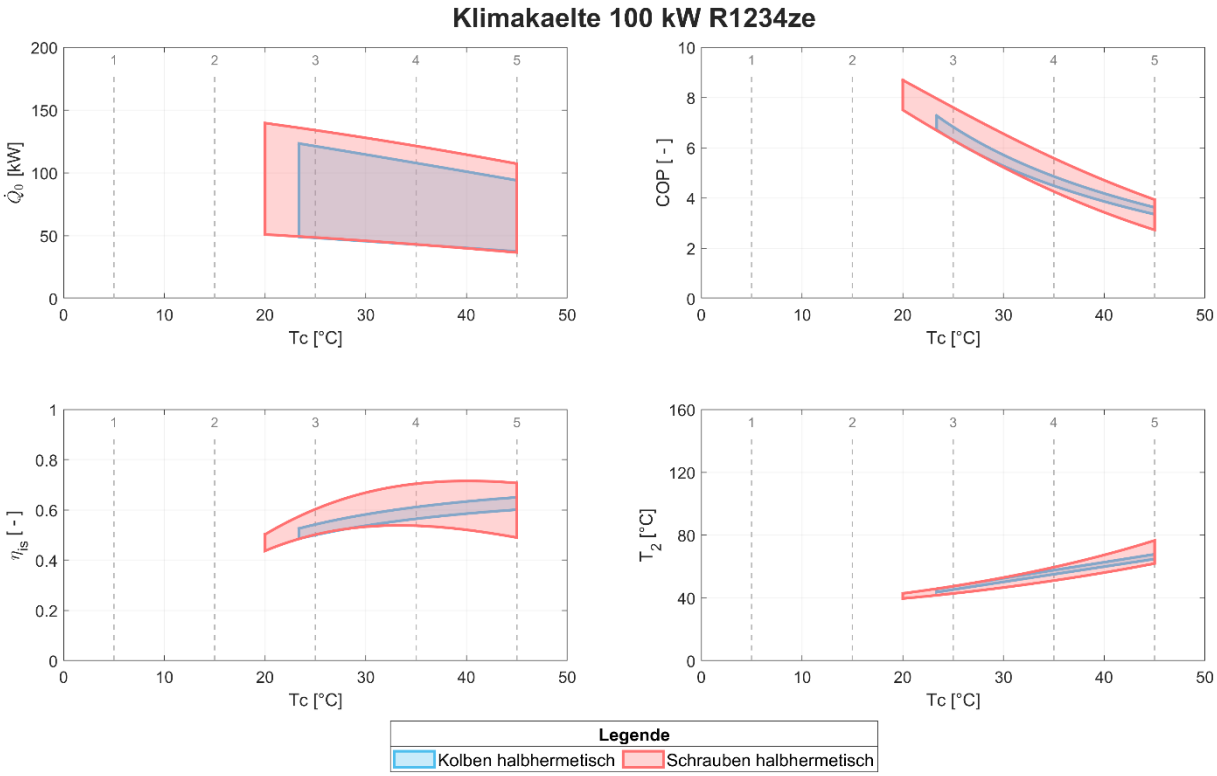

Klimakaelte 20 kW R513A
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
Scroll hermetisch
Kolben hermetisch
Kolben halbhermetisch

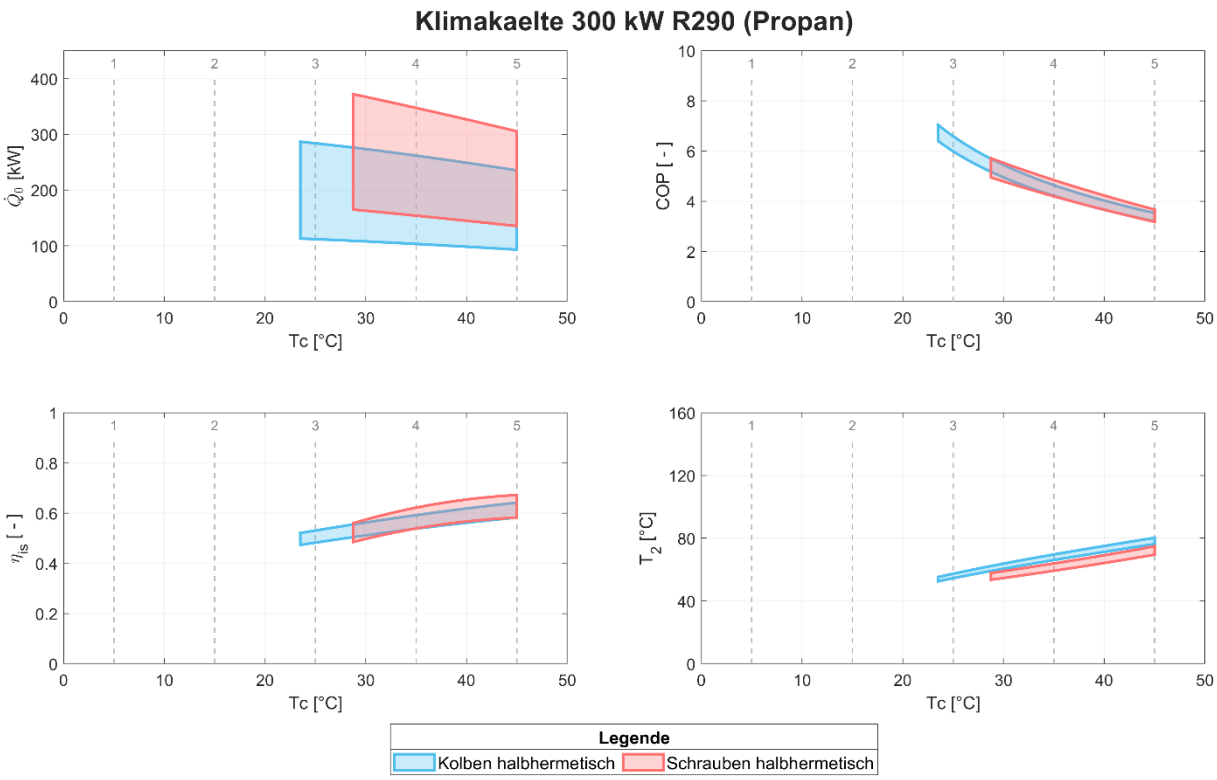

Klimakaelte 50 kW R290 (Propan)
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
Scroll hermetisch
Kolben halbhermetisch

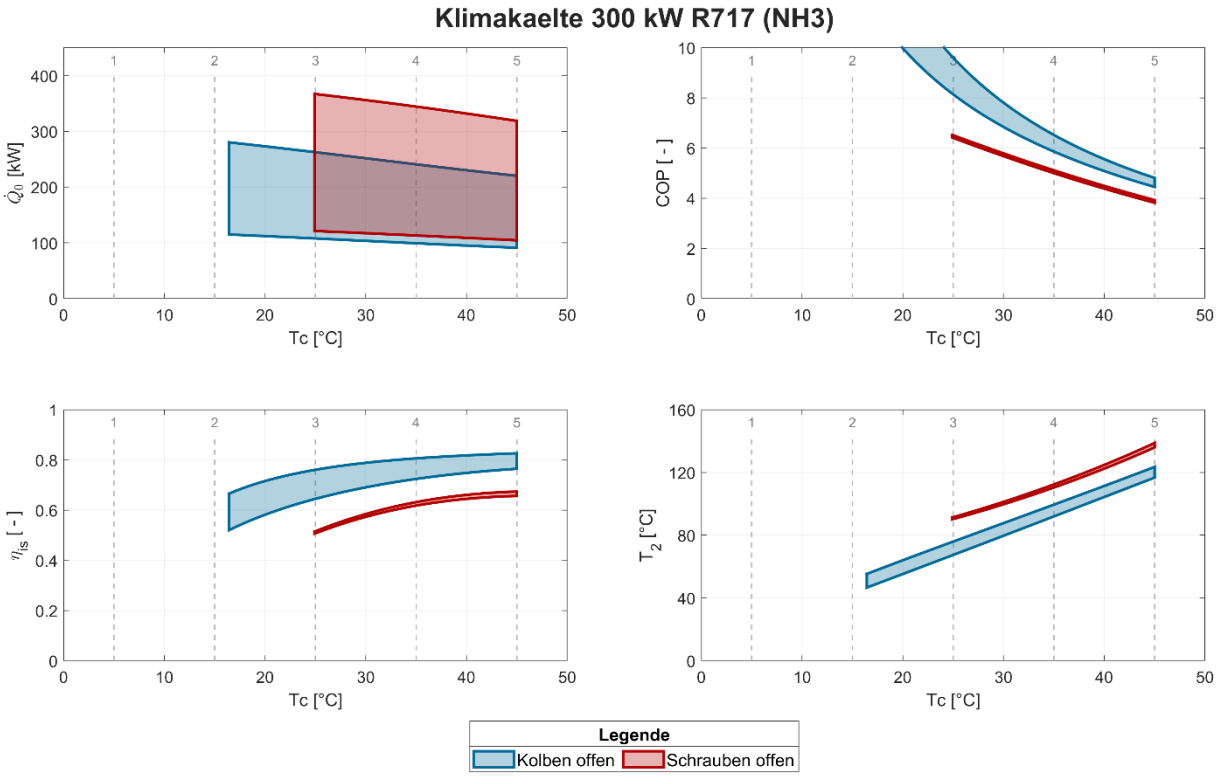

Klimakaelte 50 kW R1234ze
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
Kolben halbhermetisch
Schrauben halbhermetisch

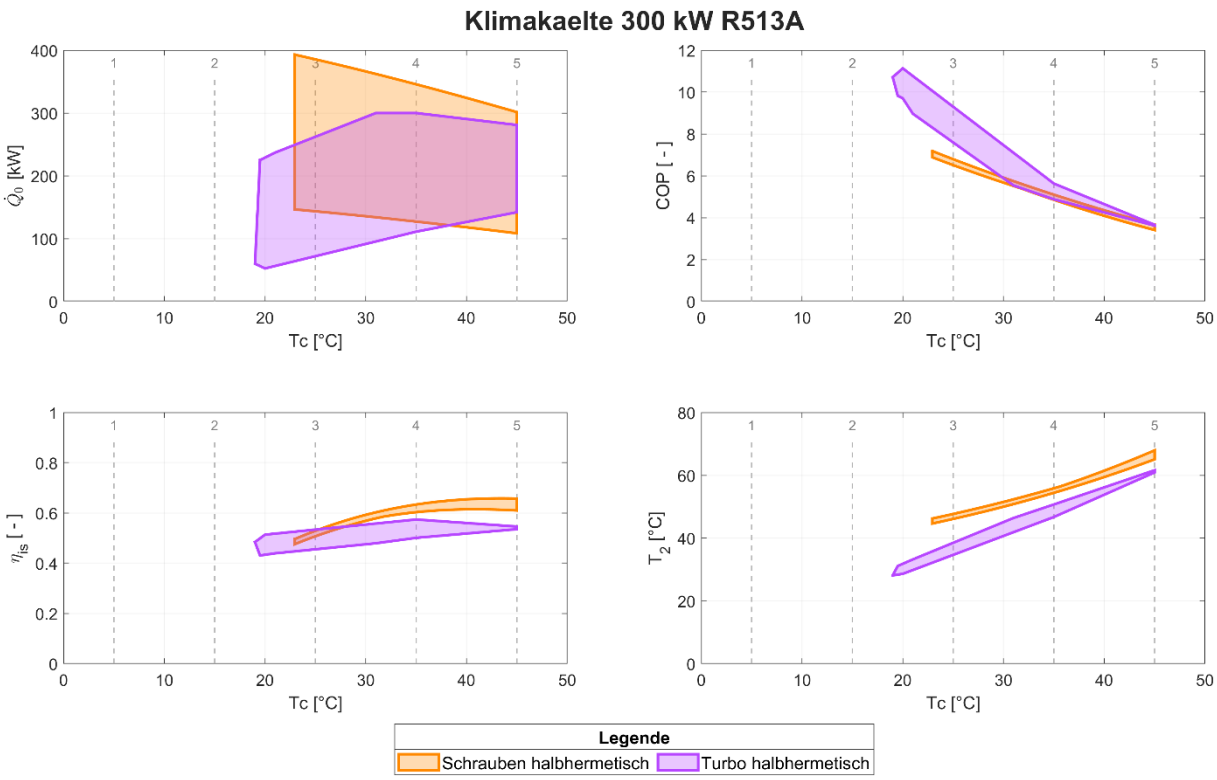

Klimakaelte 100 kW R513A
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
Kolben halbhermetisch
Schrauben halbhermetisch

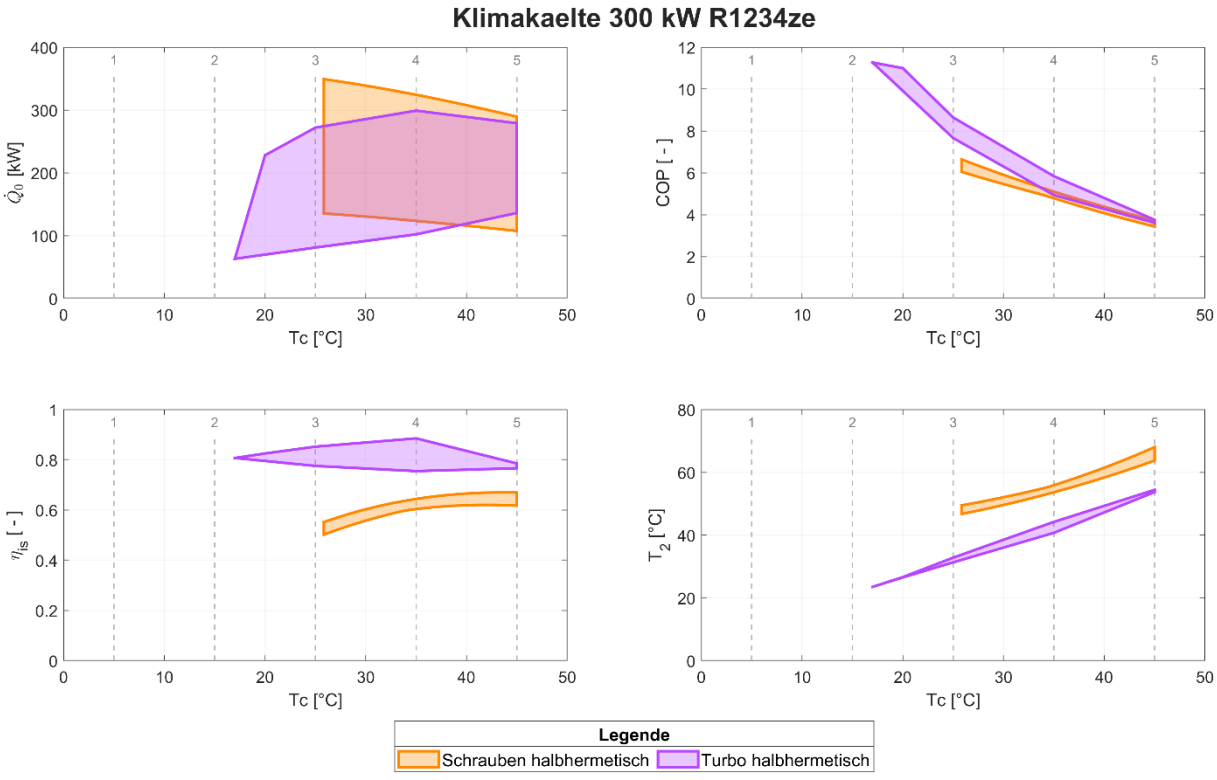

Klimakaelte 100 kW R717 (NH3)
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
Kolben offen
Schrauben offen


Klimakaelte 100 kW R1234ze
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
Kolben halbhermetisch
Schrauben halbhermetisch

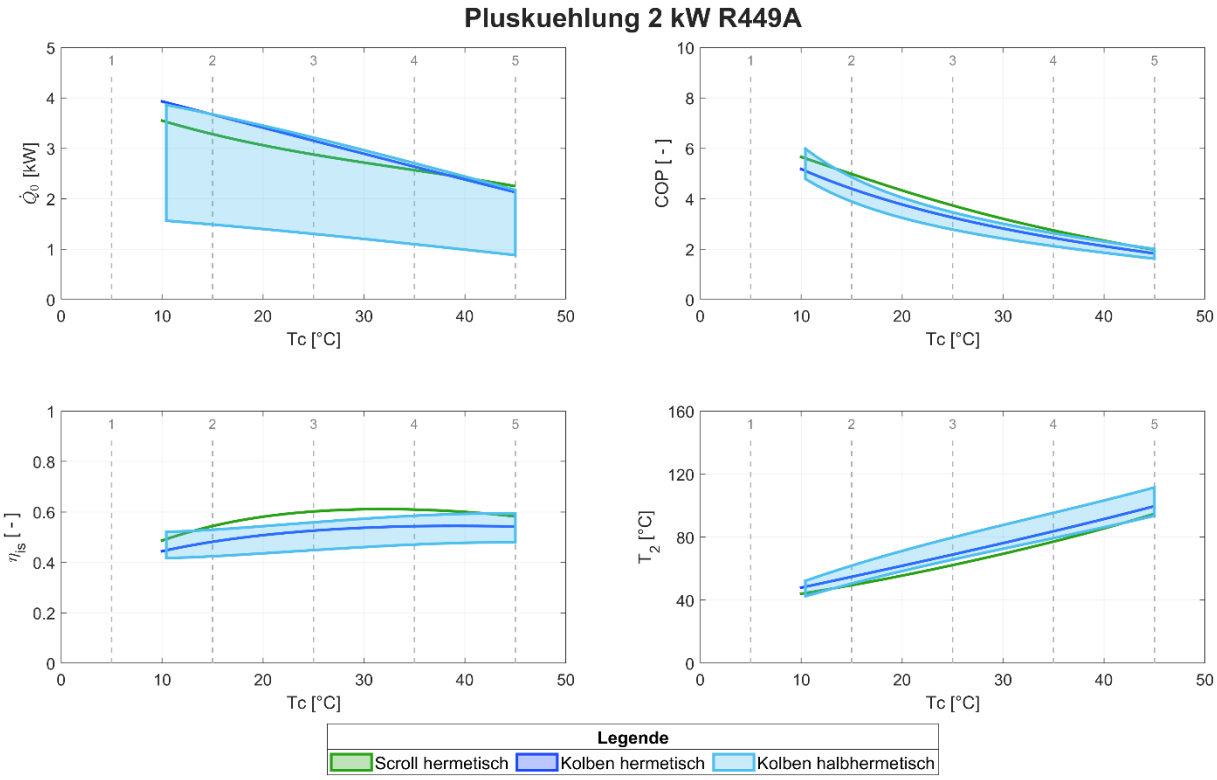

Klimakaelte 300 kW R290 (Propan)
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
Kolben halbhermetisch
Schrauben halbhermetisch

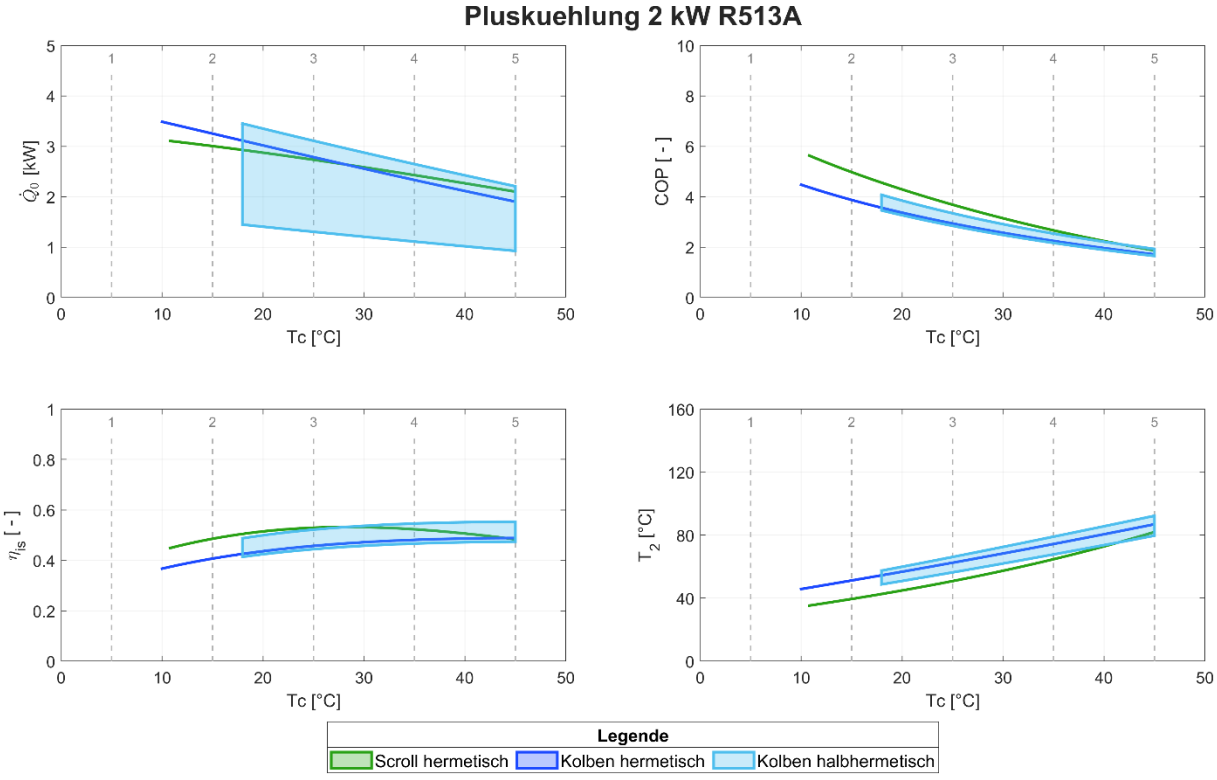

Klimakaelte 300 kW R717 (NH3)
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
Kolben offen
Schrauben offen

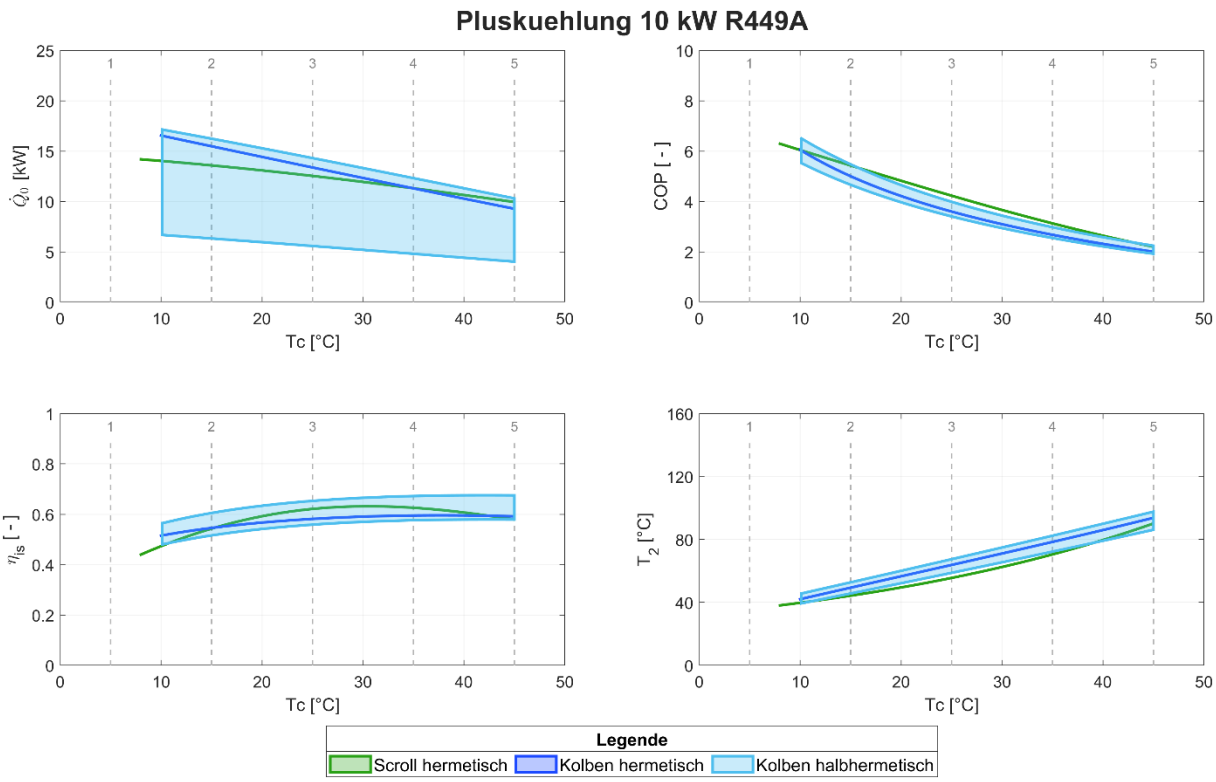

Klimakaelte 300 kW R513A
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
Schrauben halbhermetisch
Turbo halbhermetisch

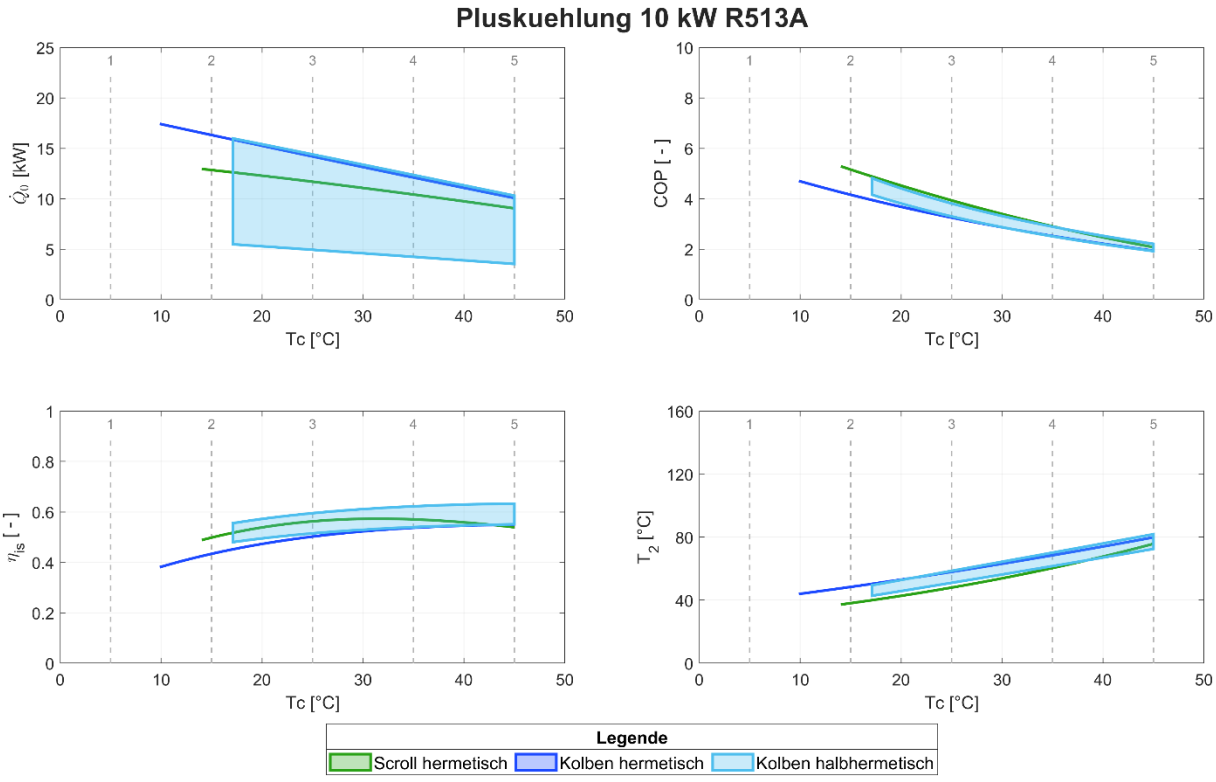

Klimakaelte 300 kW R1234ze
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
Schrauben halbhermetisch
Turbo halbhermetisch

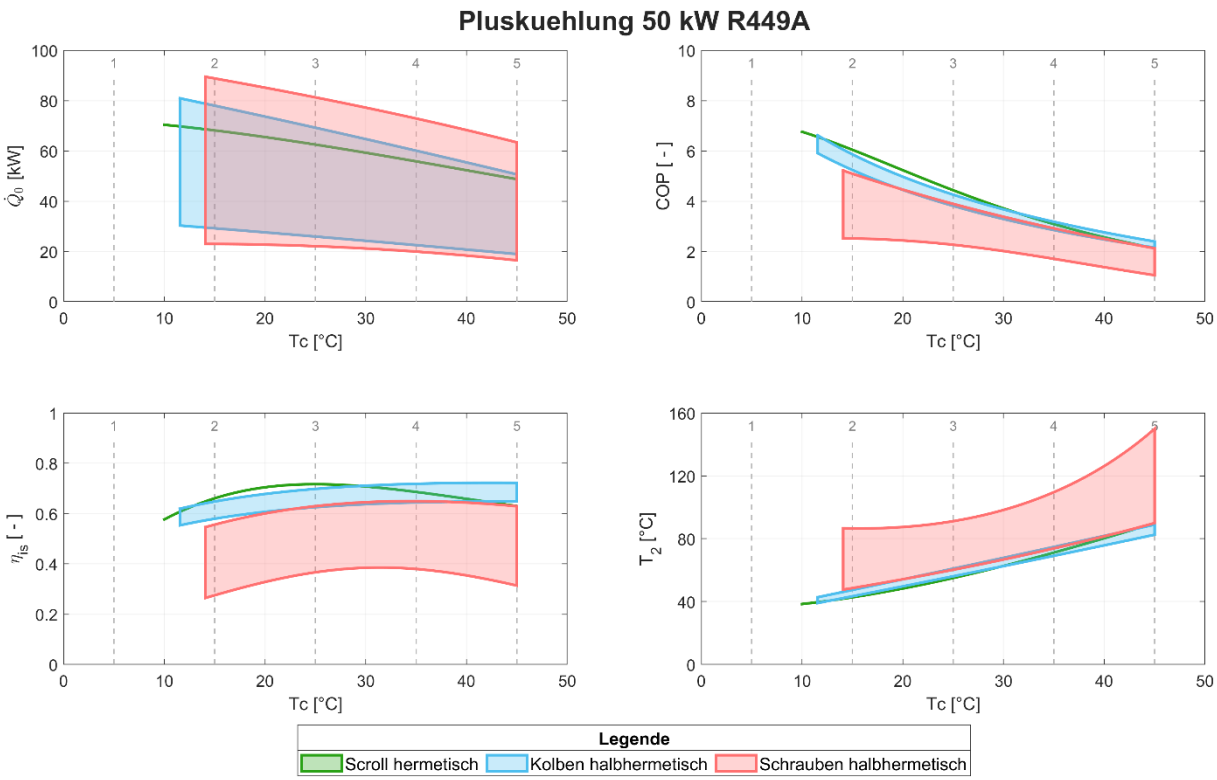
A.1.2 Vergleich Verdichterbauarten - Pluskühlung

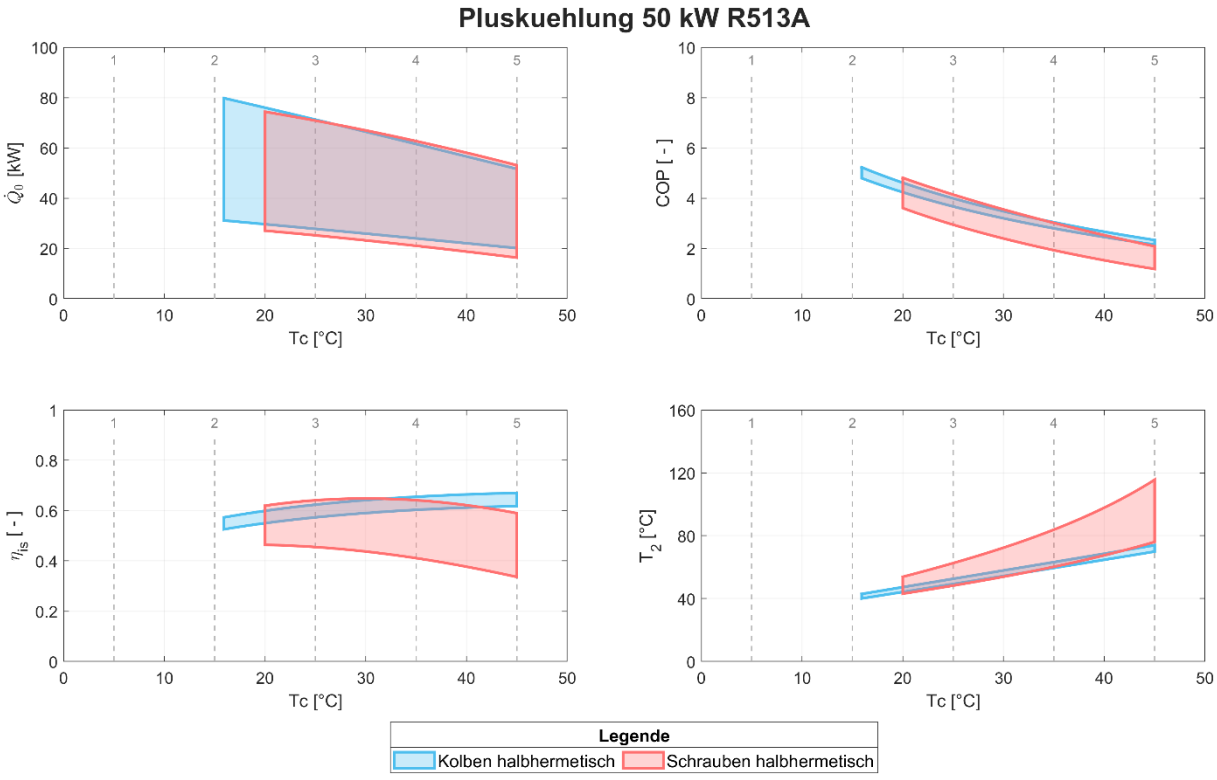


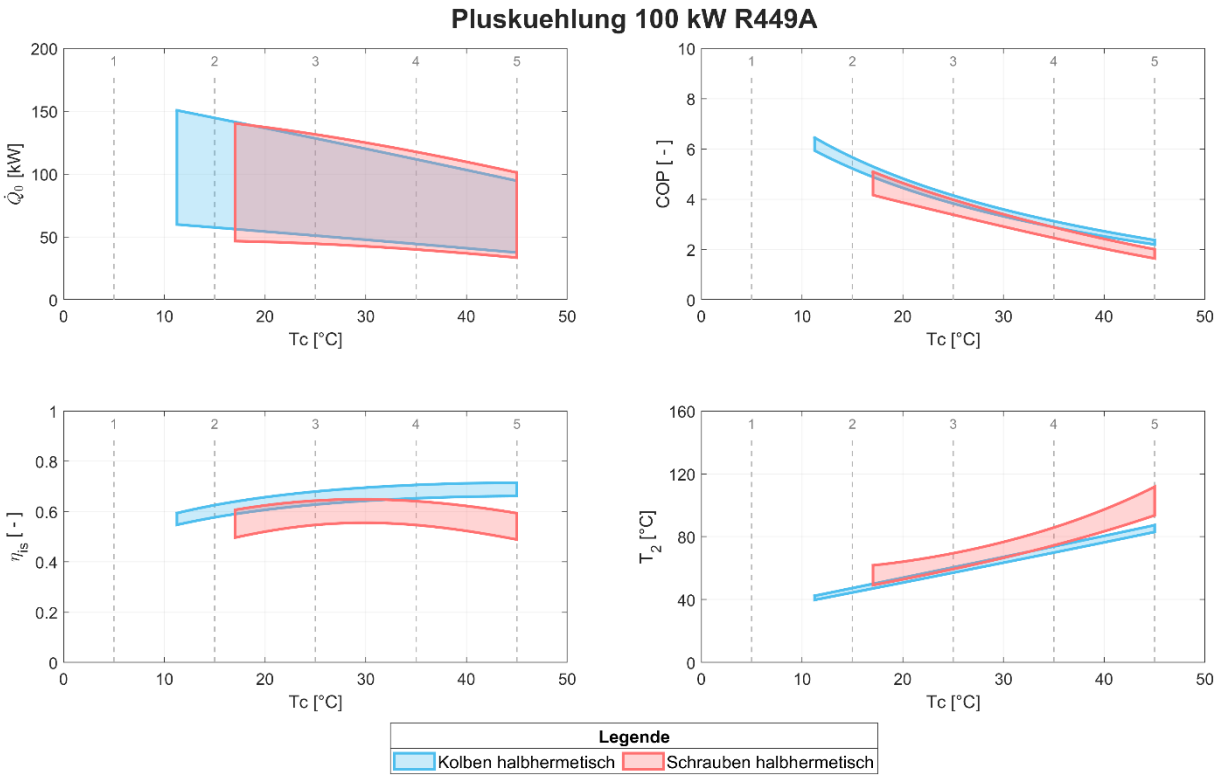


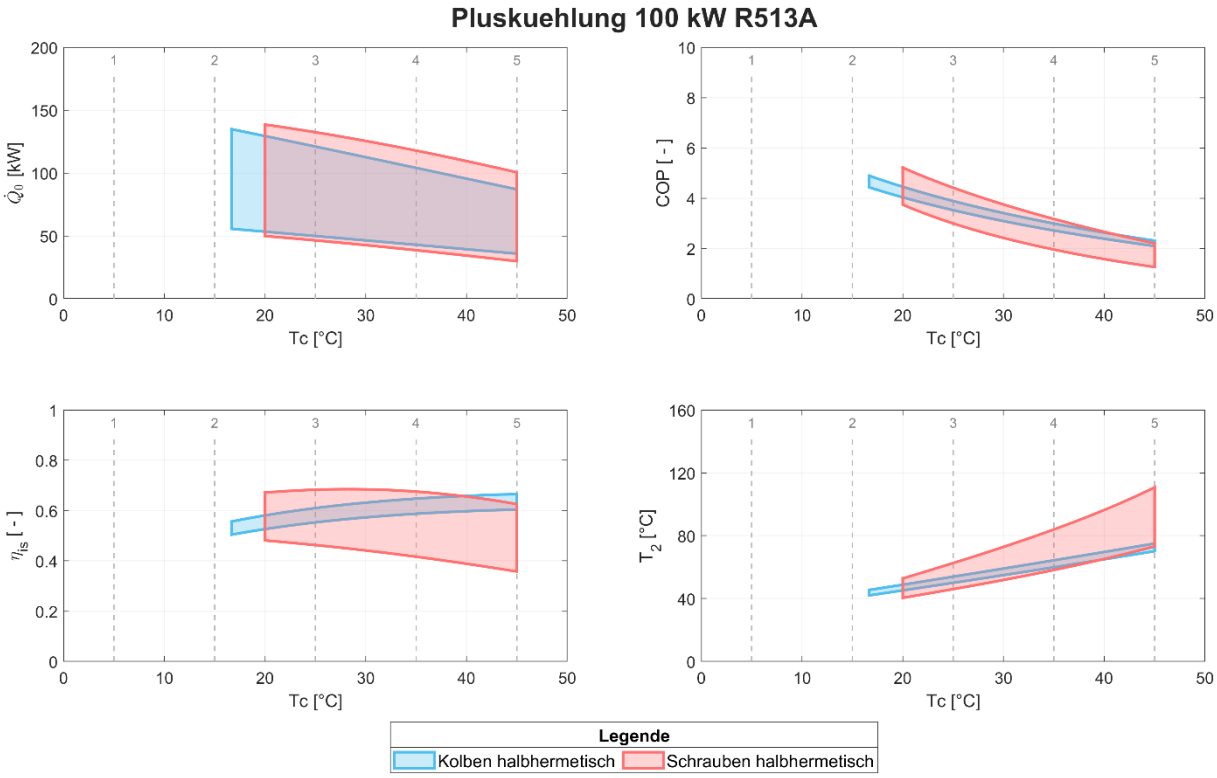

Pluskuehlung 10 kW R449A
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
Scroll hermetisch
Kolben hermetisch
Kolben halbhermetisch


Pluskuehlung 10 kW R513A
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
Scroll hermetisch
Kolben hermetisch
Kolben halbhermetisch

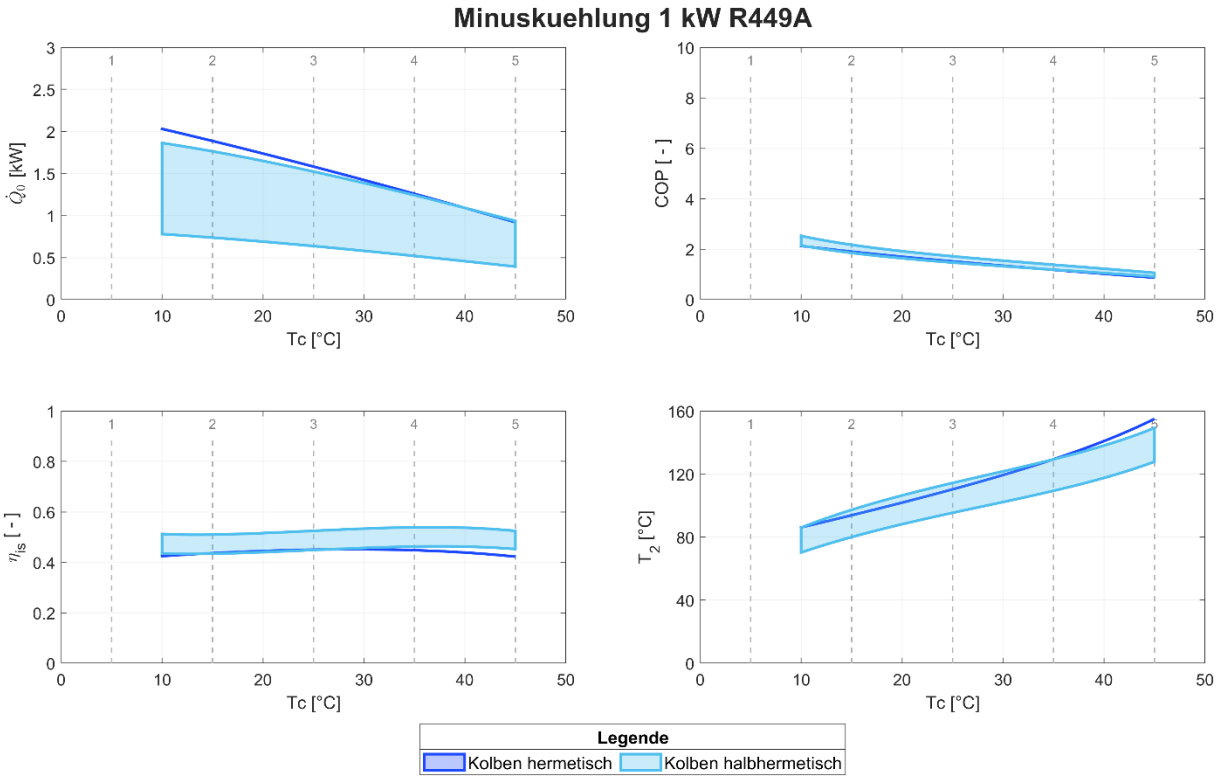

Pluskuehlung 50 kW R449A
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
Scroll hermetisch
Kolben halbhermetisch
Schrauben halbhermetisch

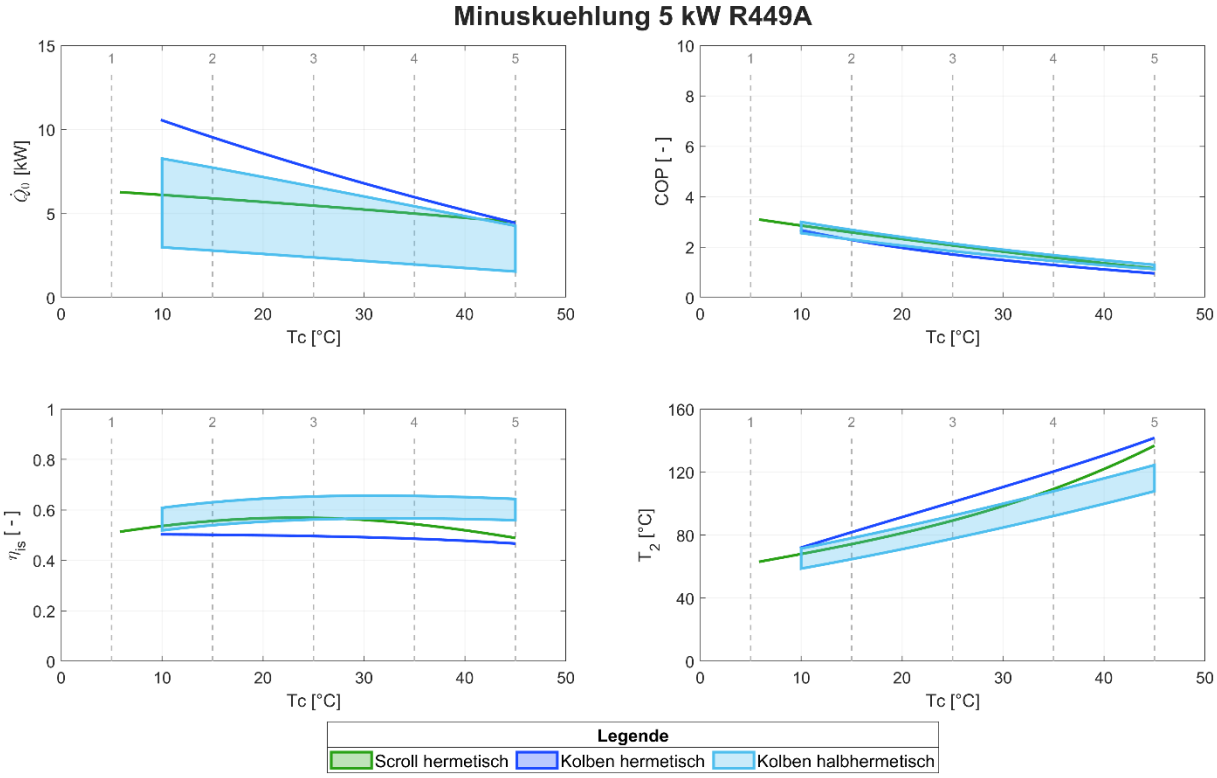

Pluskuehlung 50 kW R513A
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
Kolben halbhermetisch
Schrauben halbhermetisch

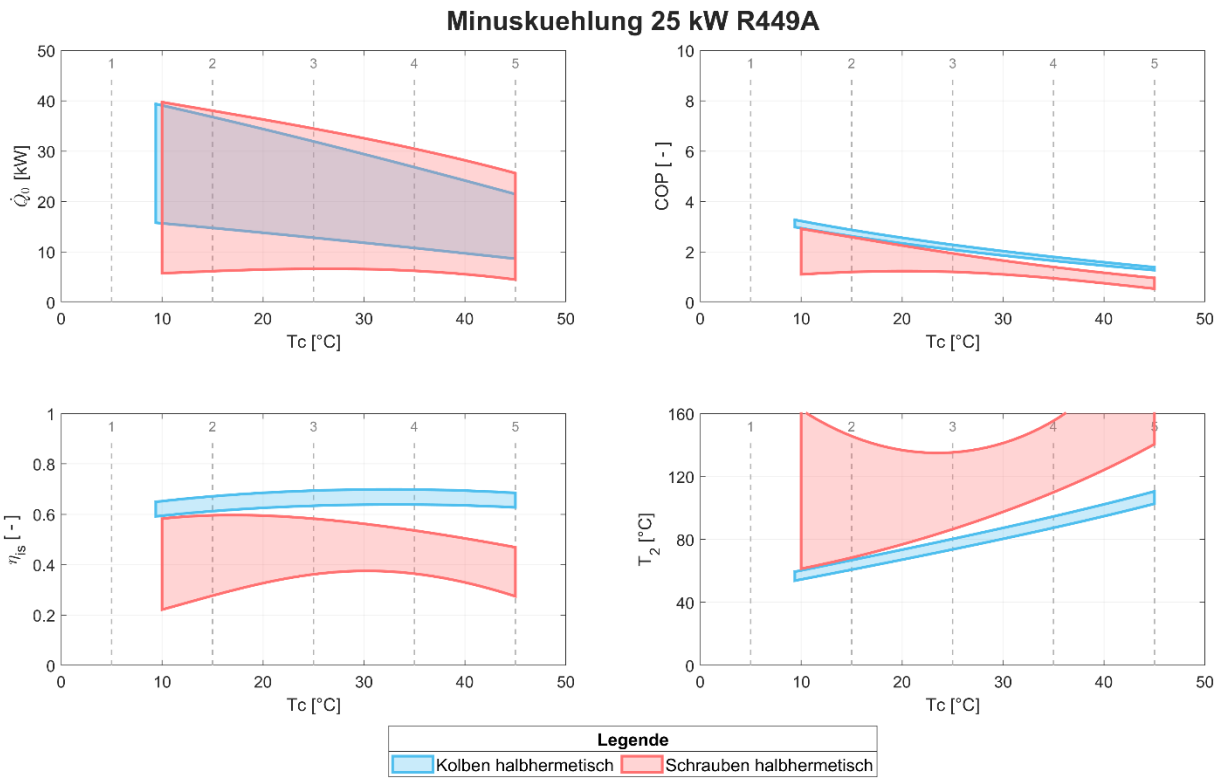

Pluskuehlung 100 kW R449A
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
Kolben halbhermetisch
Schrauben halbhermetisch

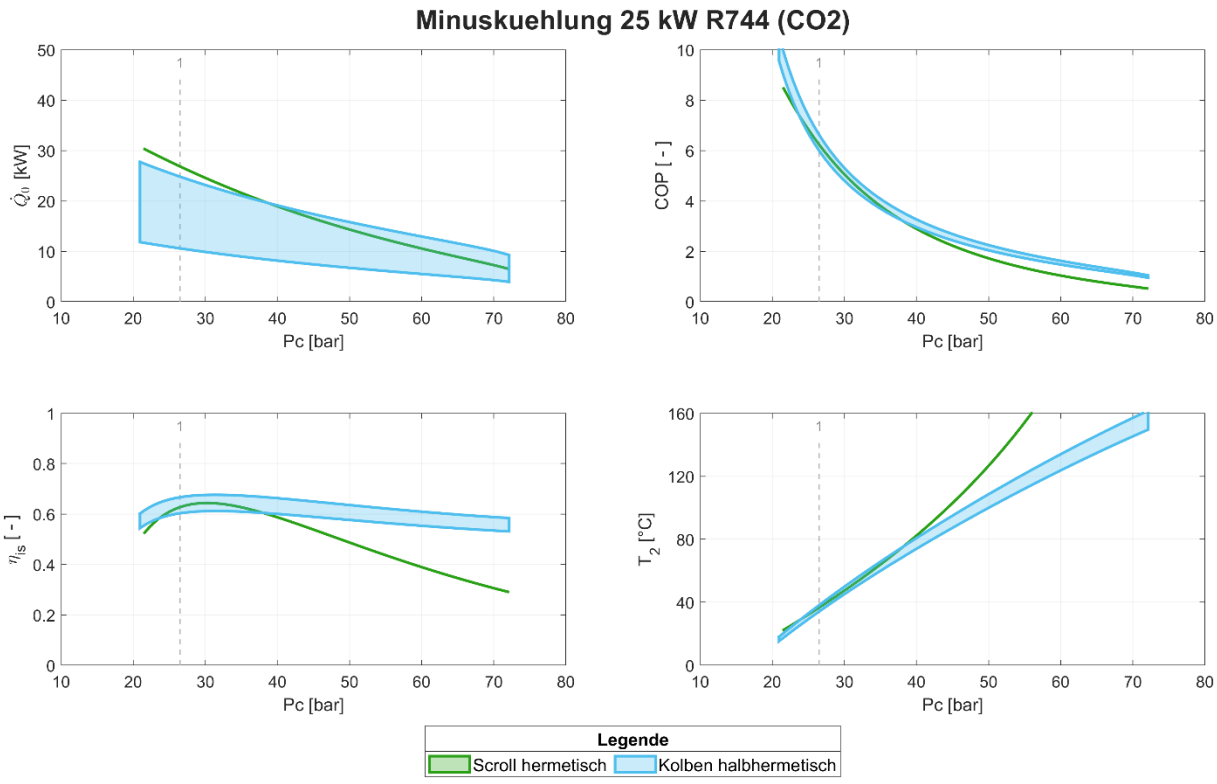

Pluskuehlung 100 kW R513A
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
Kolben halbhermetisch
Schrauben halbhermetisch

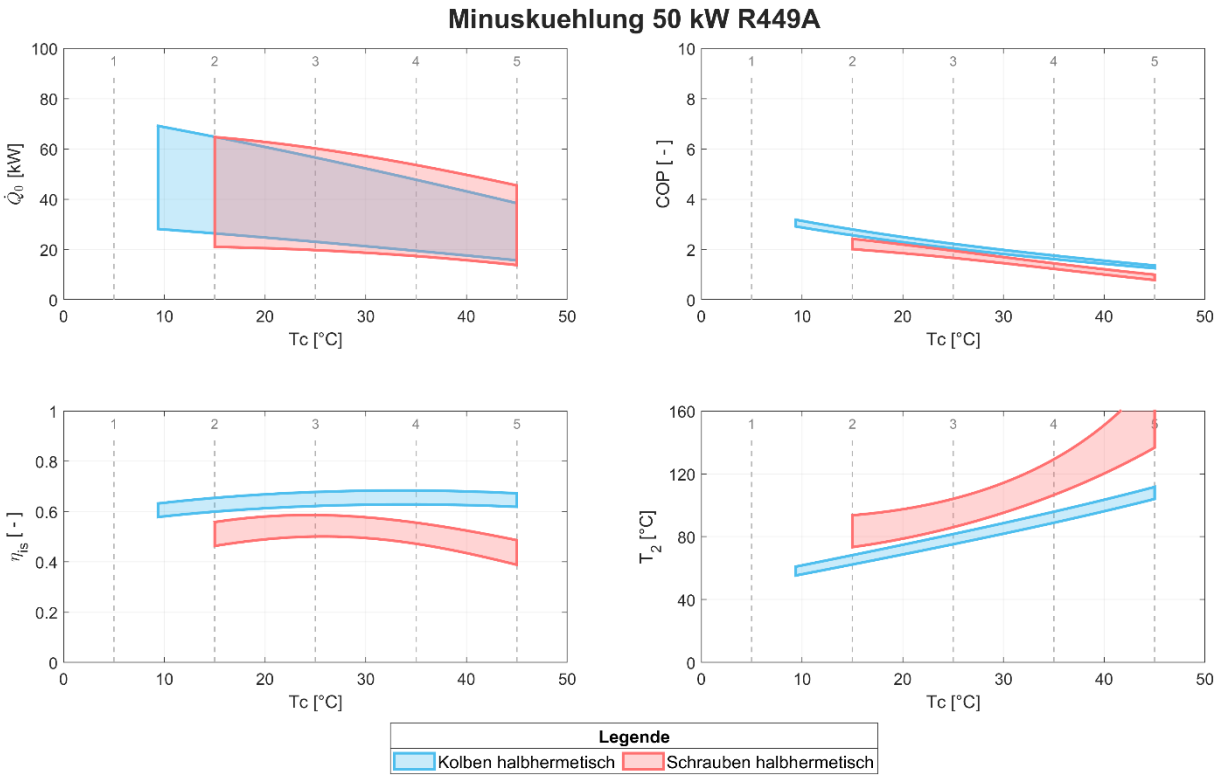
A.1.3 Vergleich Verdichterbauarten - Minuskühlung





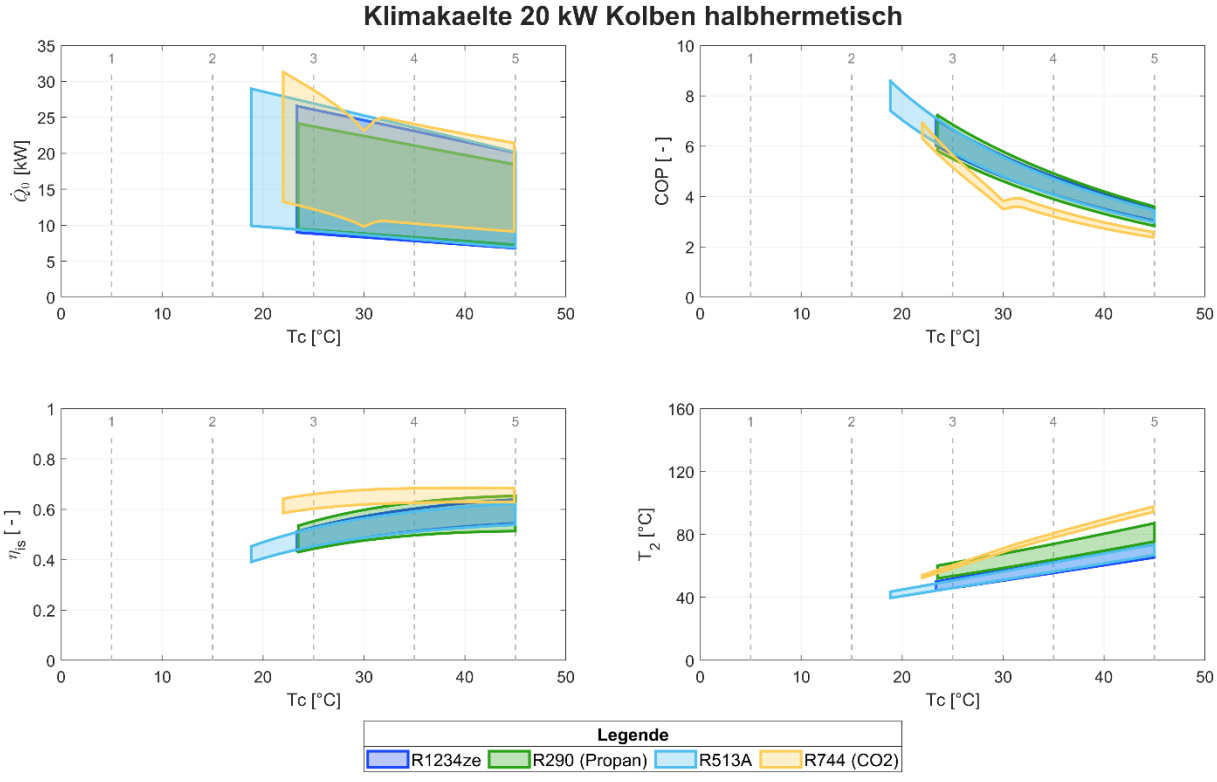

Minuskuehlung 25 kW R449A
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
Kolben halbhermetisch
Schrauben halbhermetisch

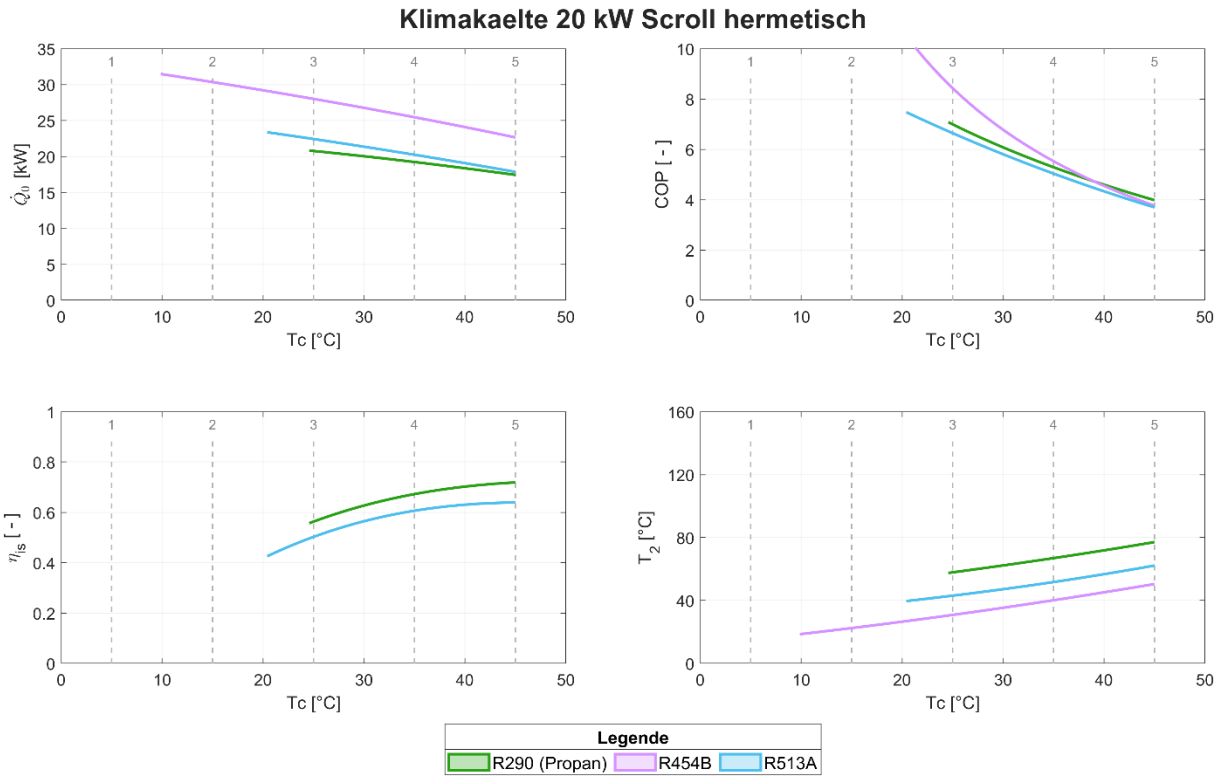

Minuskuehlung 25 kW R744 (CO2)
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Pc [bar]
Legende
Scroll hermetisch
Kolben halbhermetisch

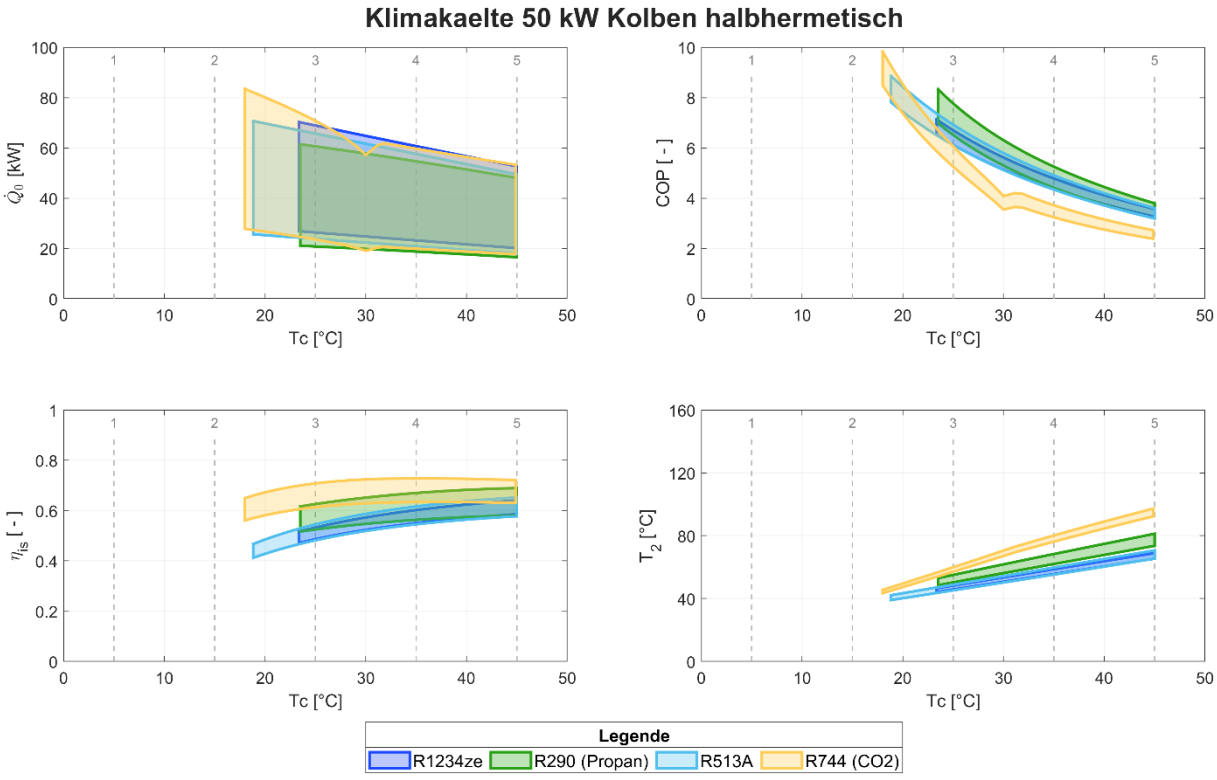


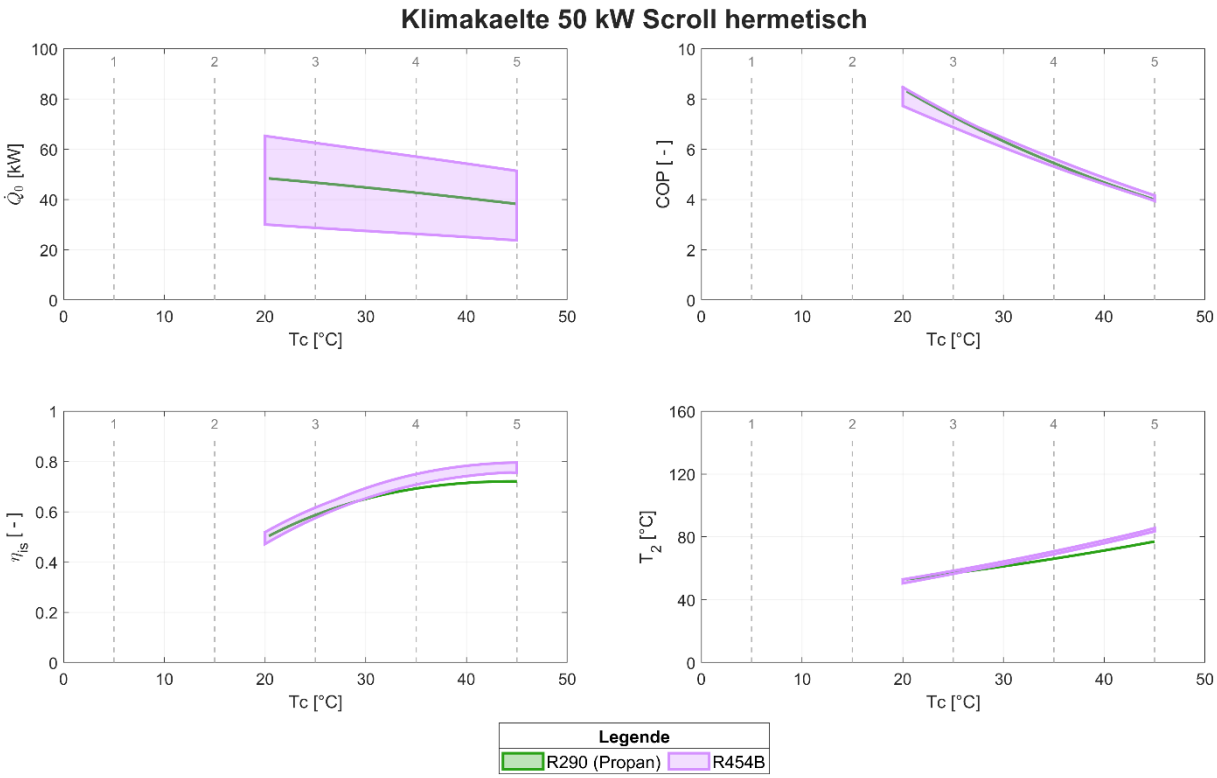
A.2 Vergleich Kältemittel

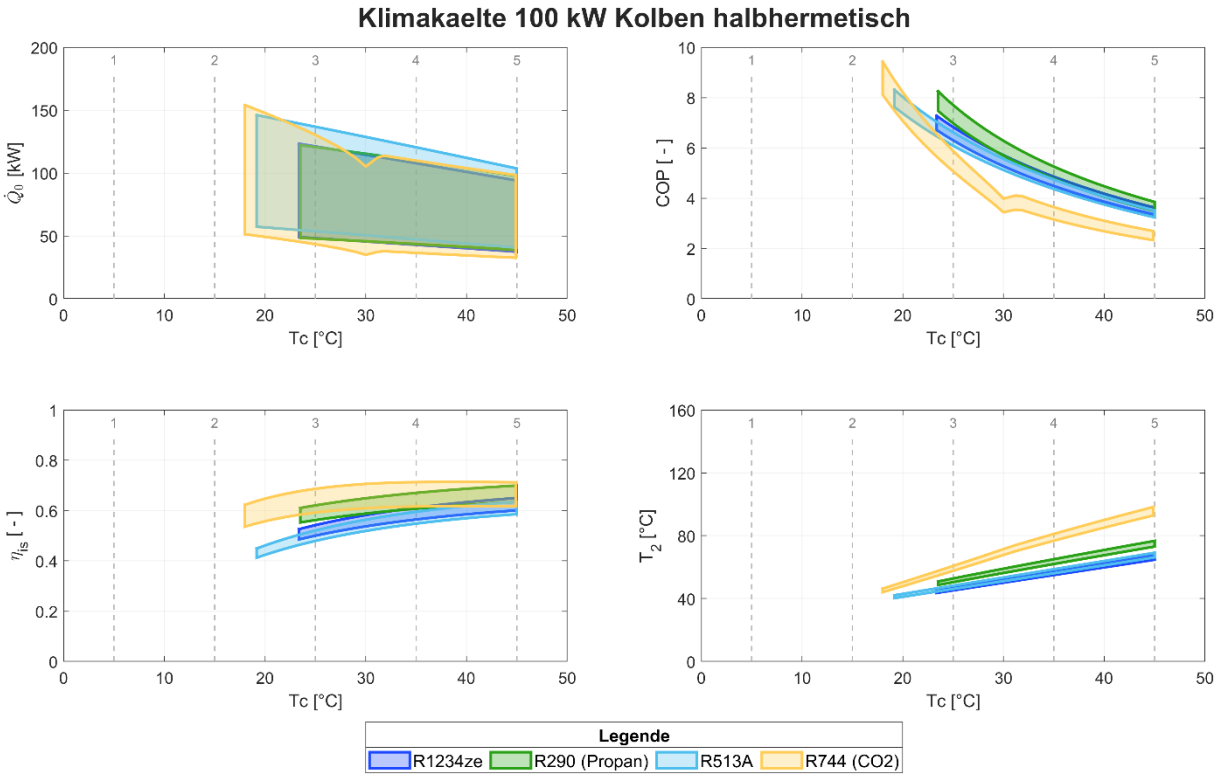
A.2.1 Vergleich Kältemittel - Klimakälte

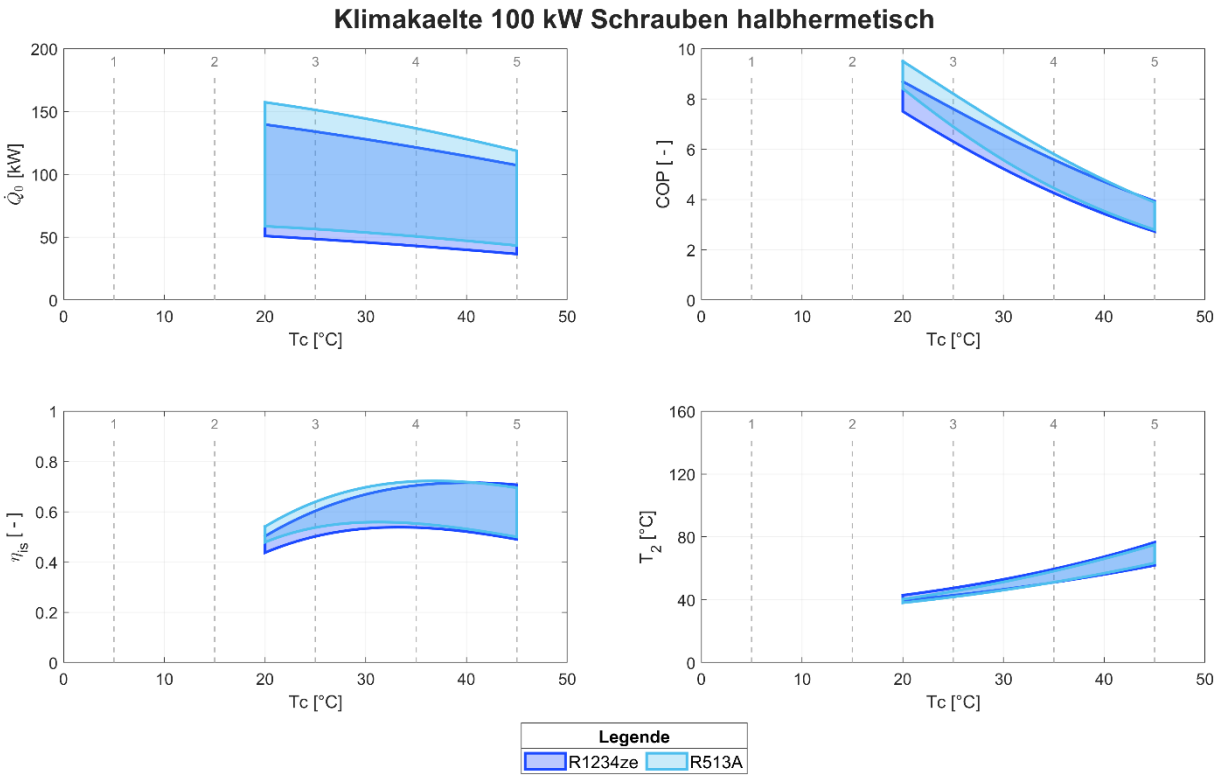



Klimakaelte 20 kW Scroll hermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
R290 (Propan)
R454B
R513A

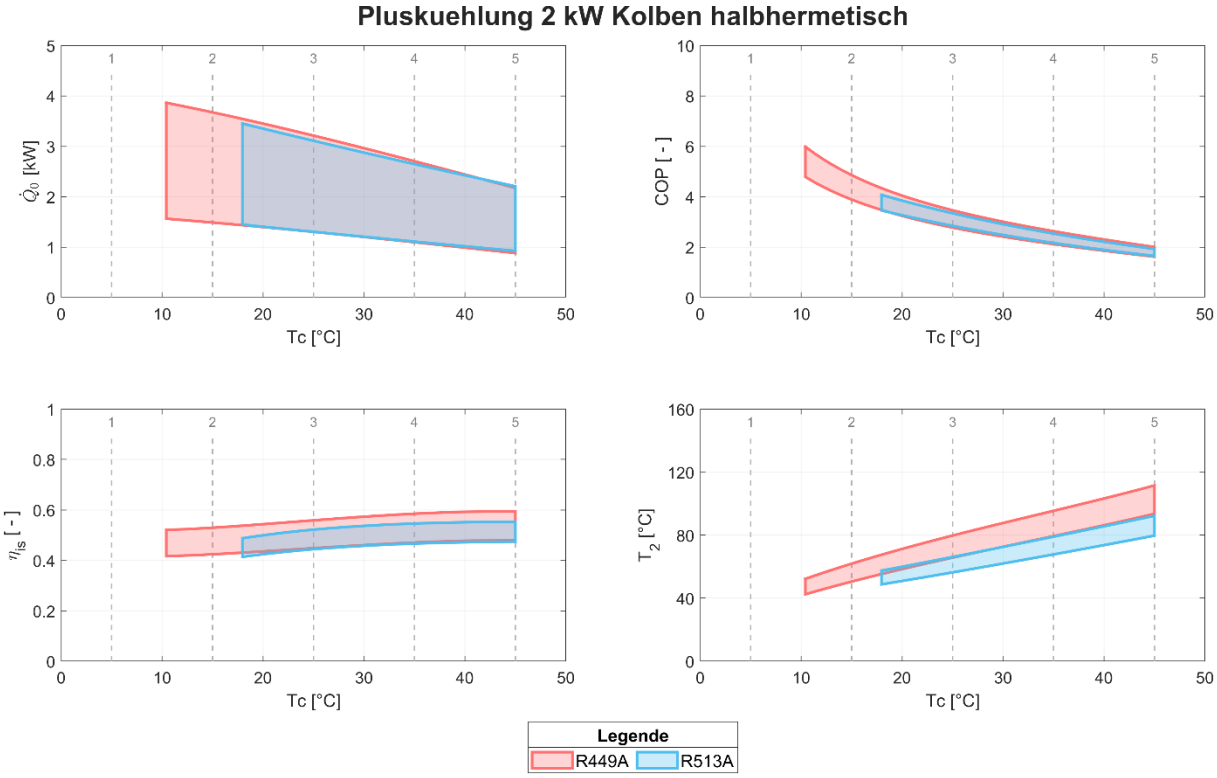

Klimakaelte 50 kW Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
R1234ze
R290 (Propan)
R513A
R744 (CO2)

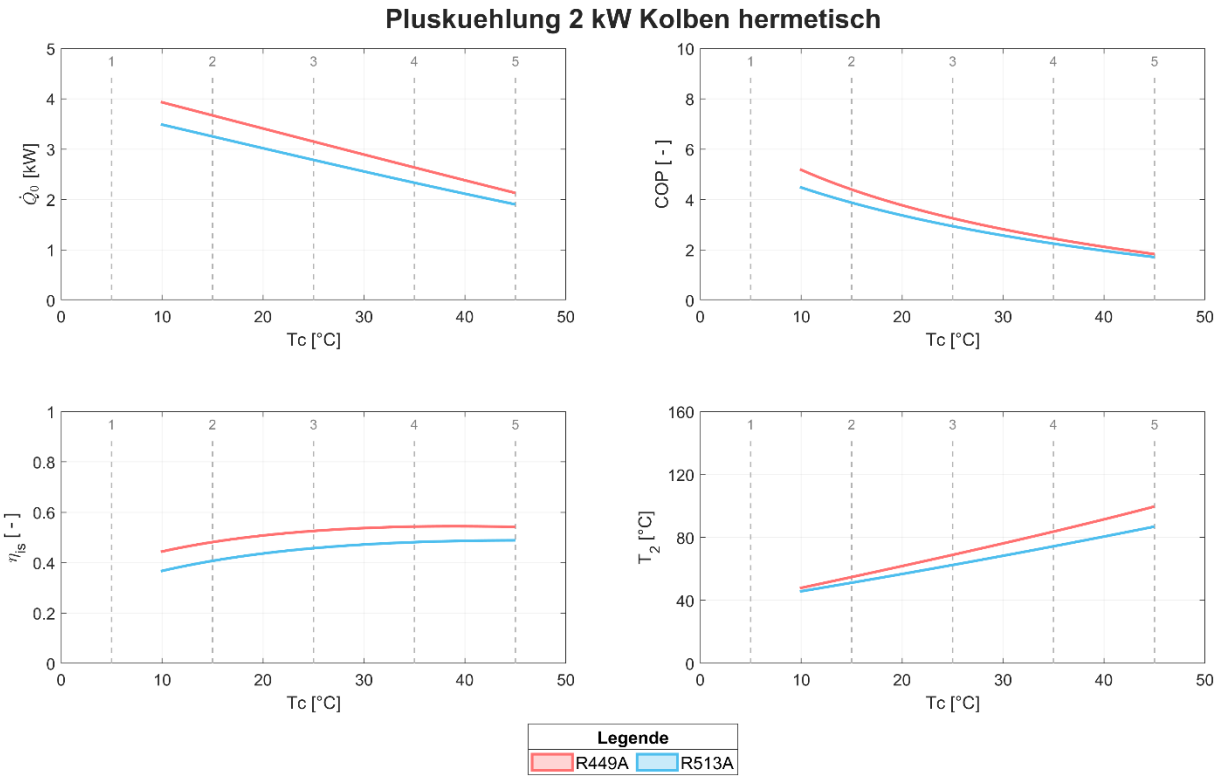

Klimakaelte 50 kW Scroll hermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
R290 (Propan)
R454B

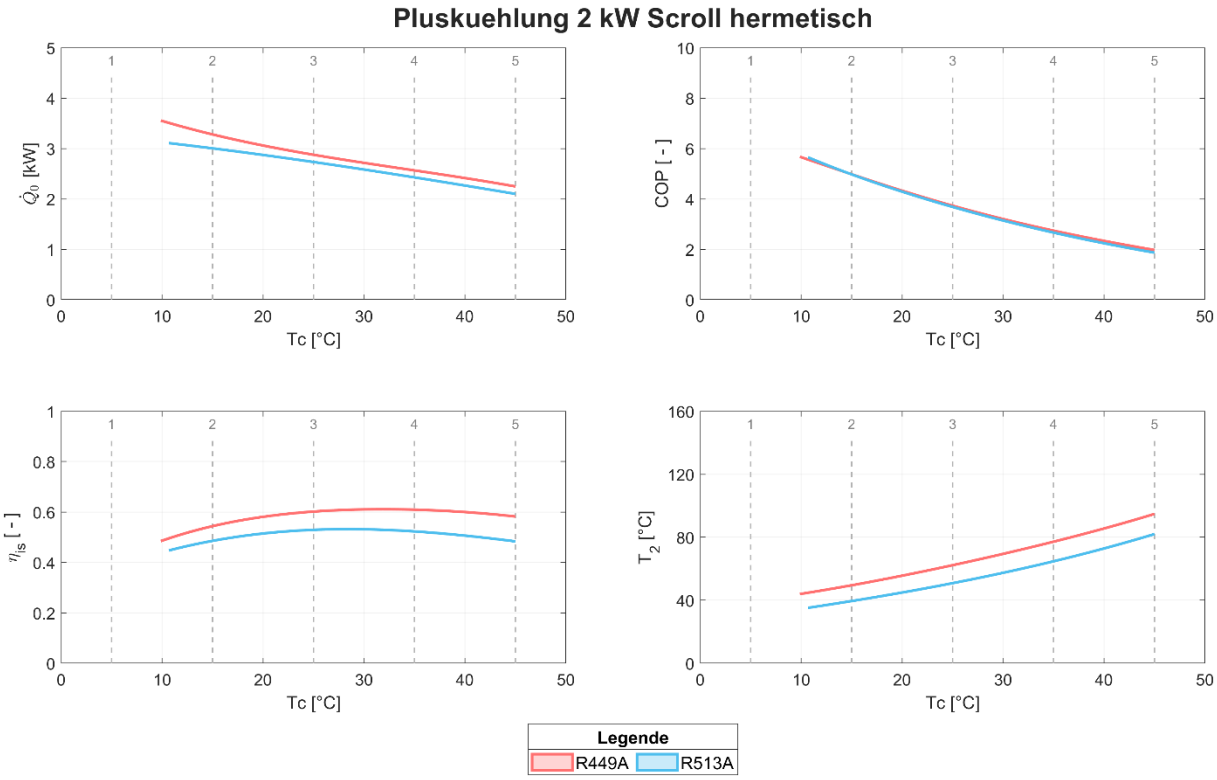

Klimakaelte 100 kW Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
R1234ze
R290 (Propan)
R513A
R744 (CO2)

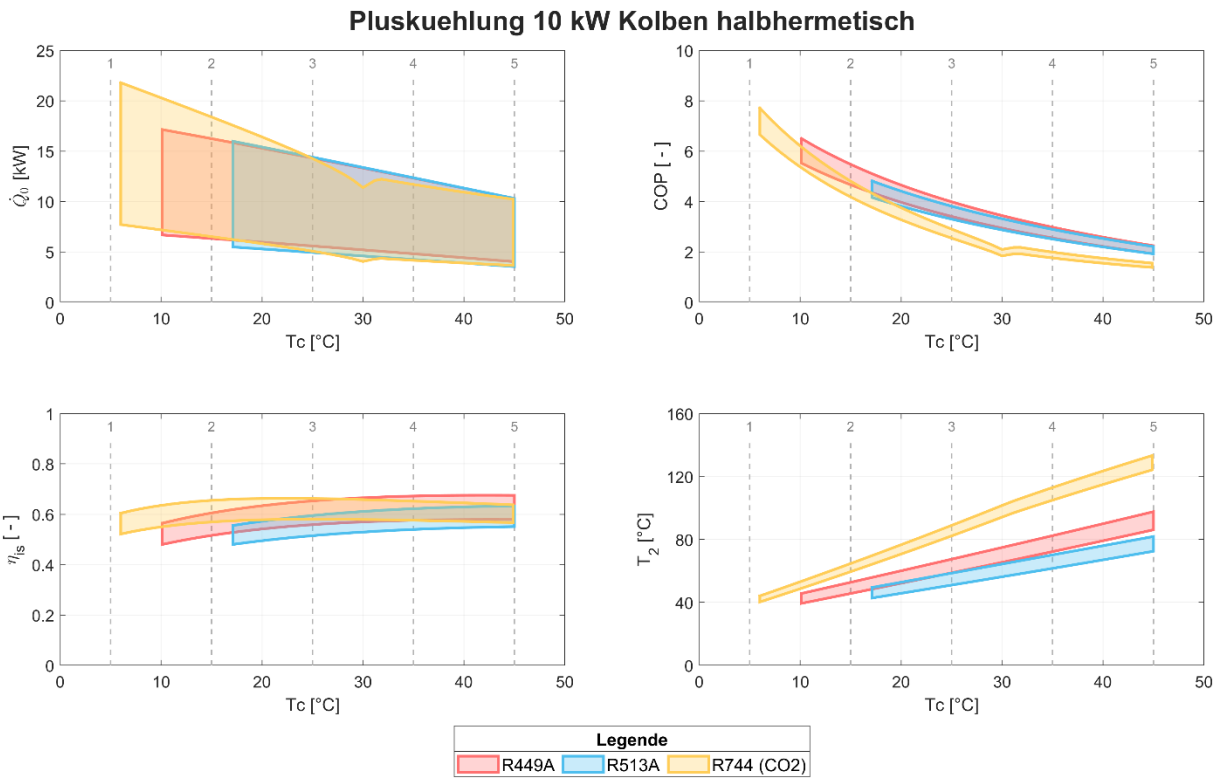


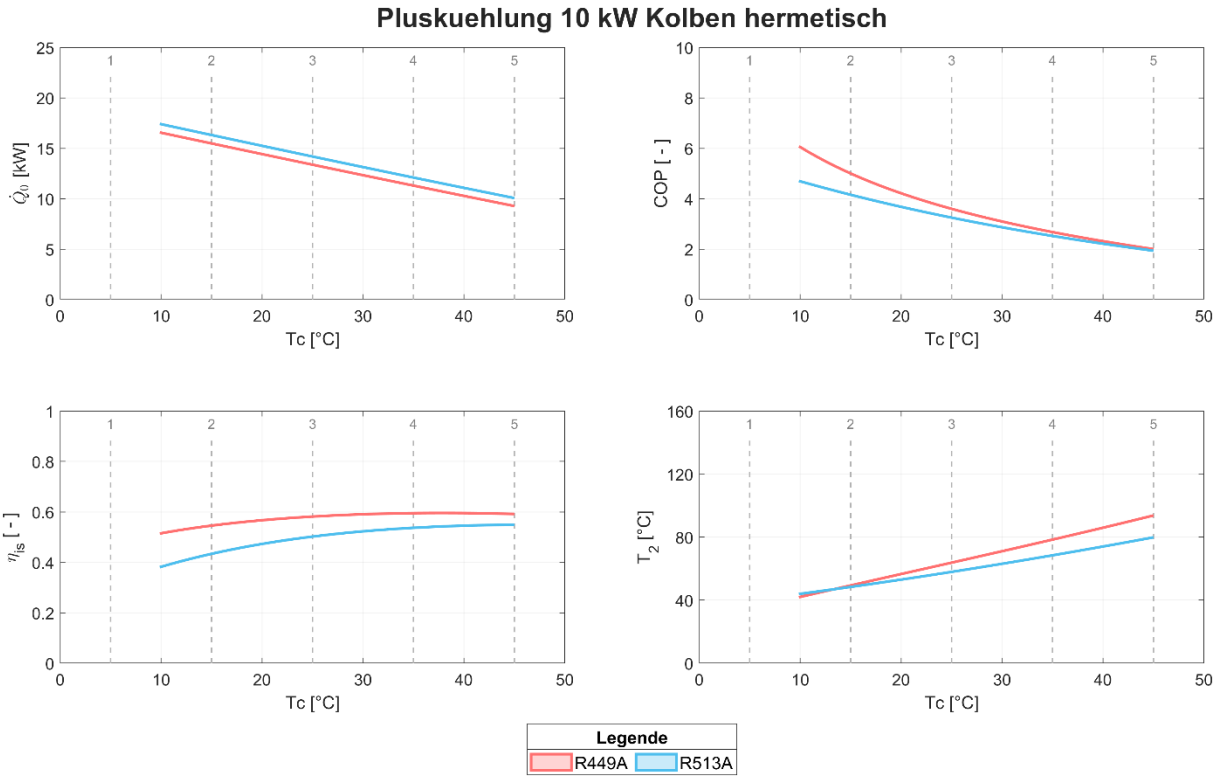
A.2.2 Vergleich Kältemittel - Pluskühlung

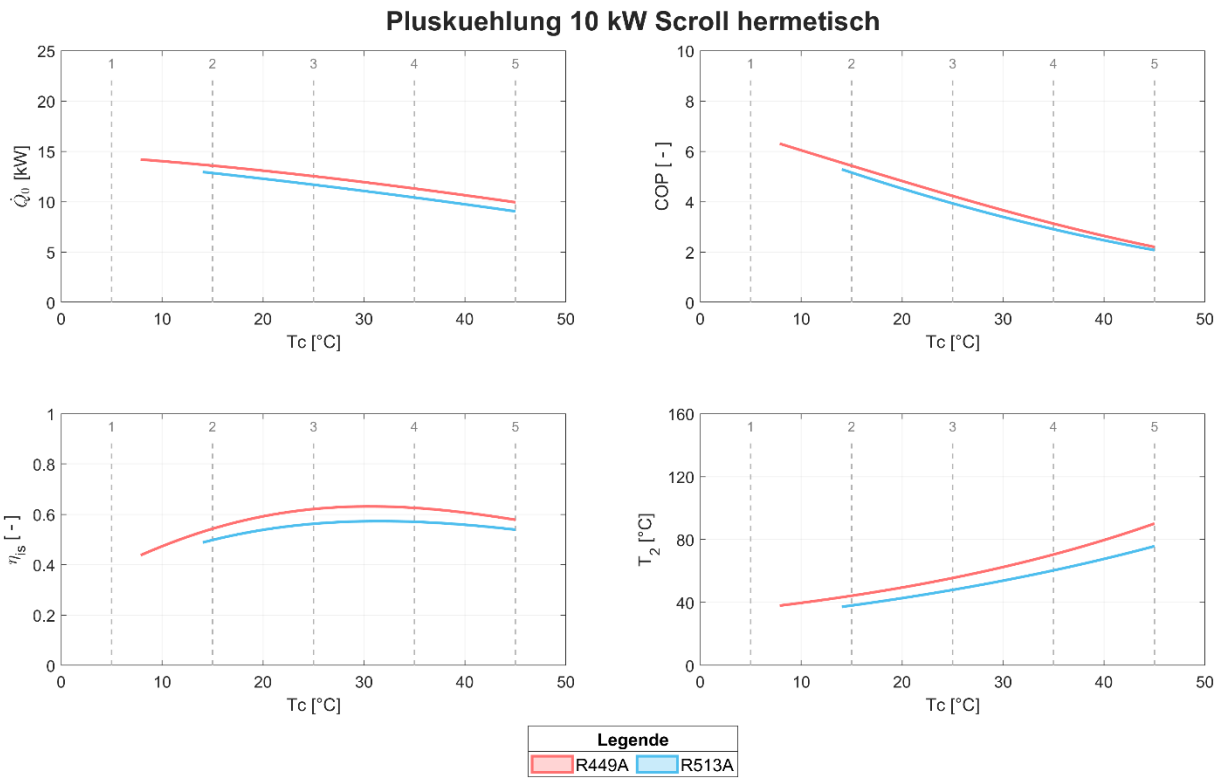


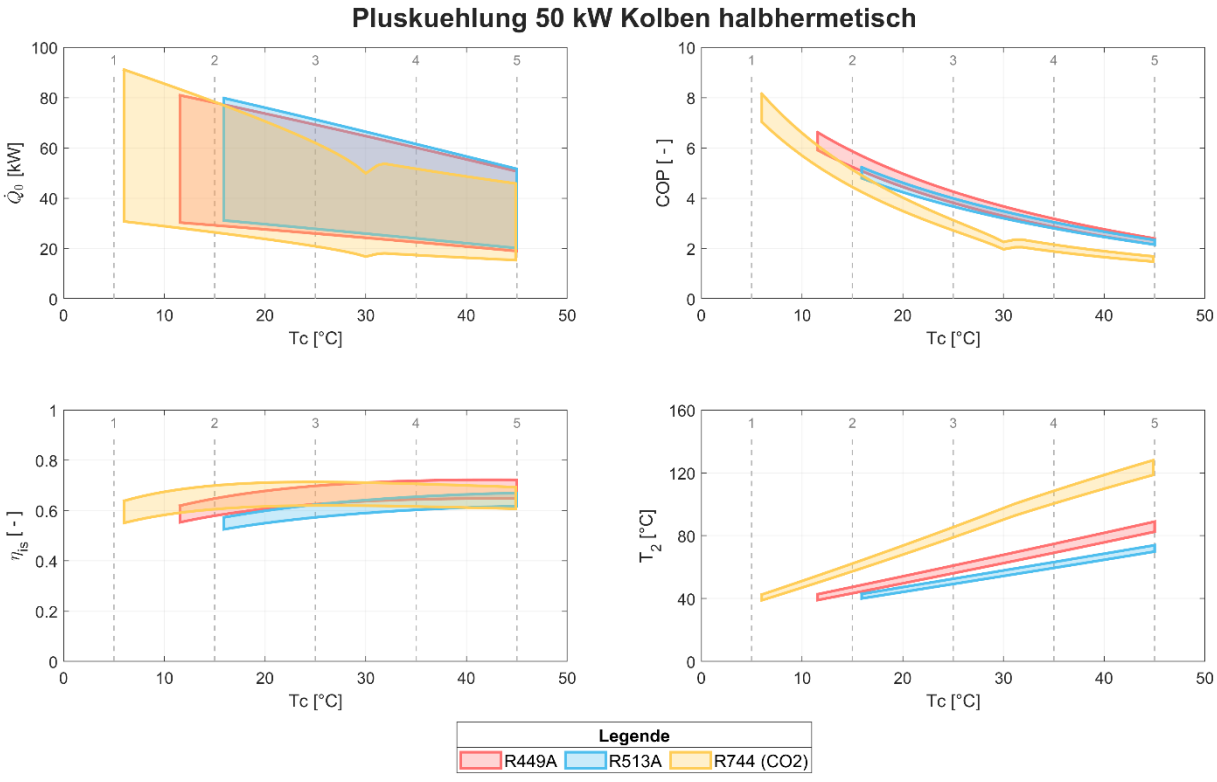

Pluskuehlung 2 kW Kolben hermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
R449A
R513A

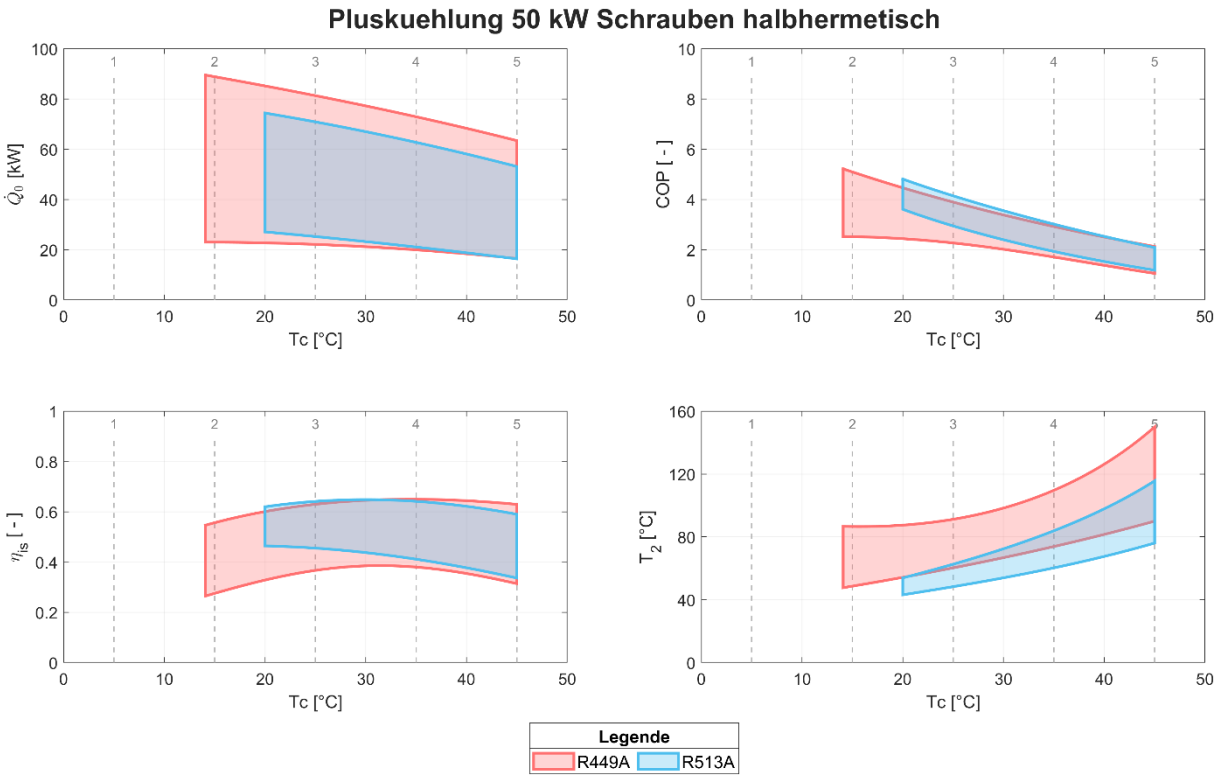

Pluskuehlung 2 kW Scroll hermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
R449A
R513A

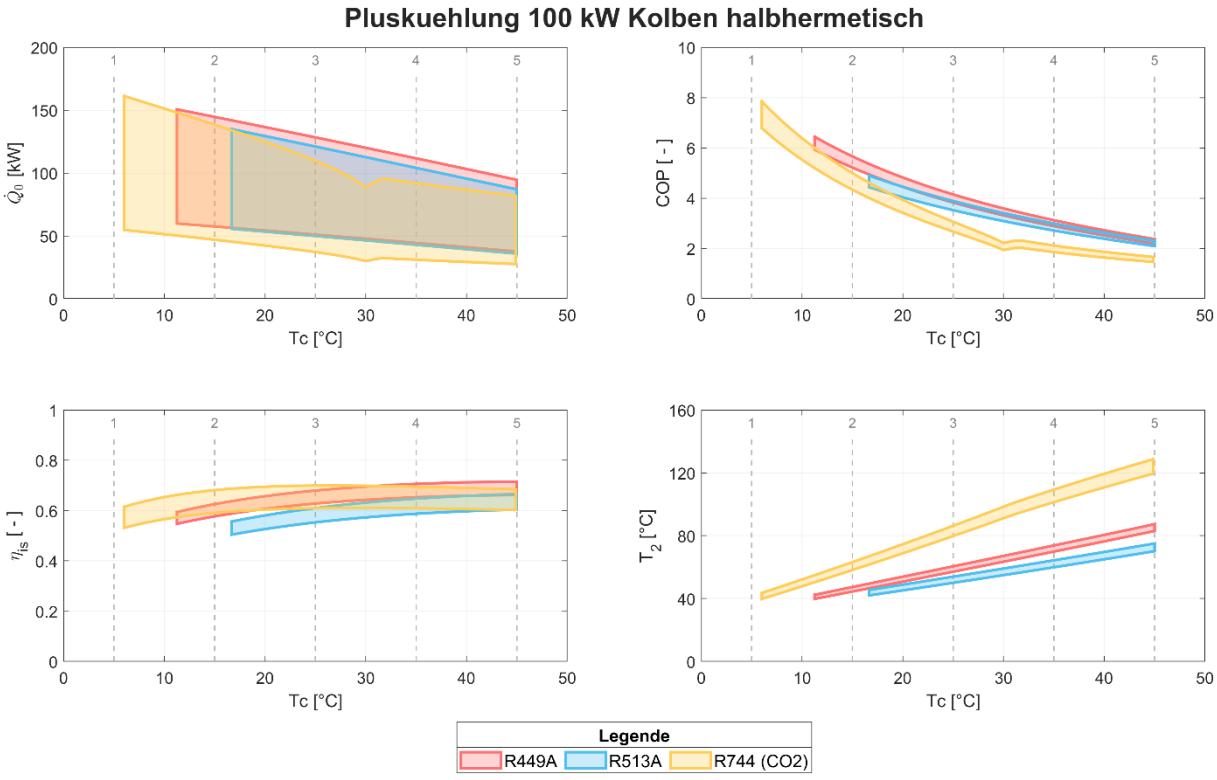

Pluskuehlung 10 kW Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
R449A
R513A
R744 (CO2)

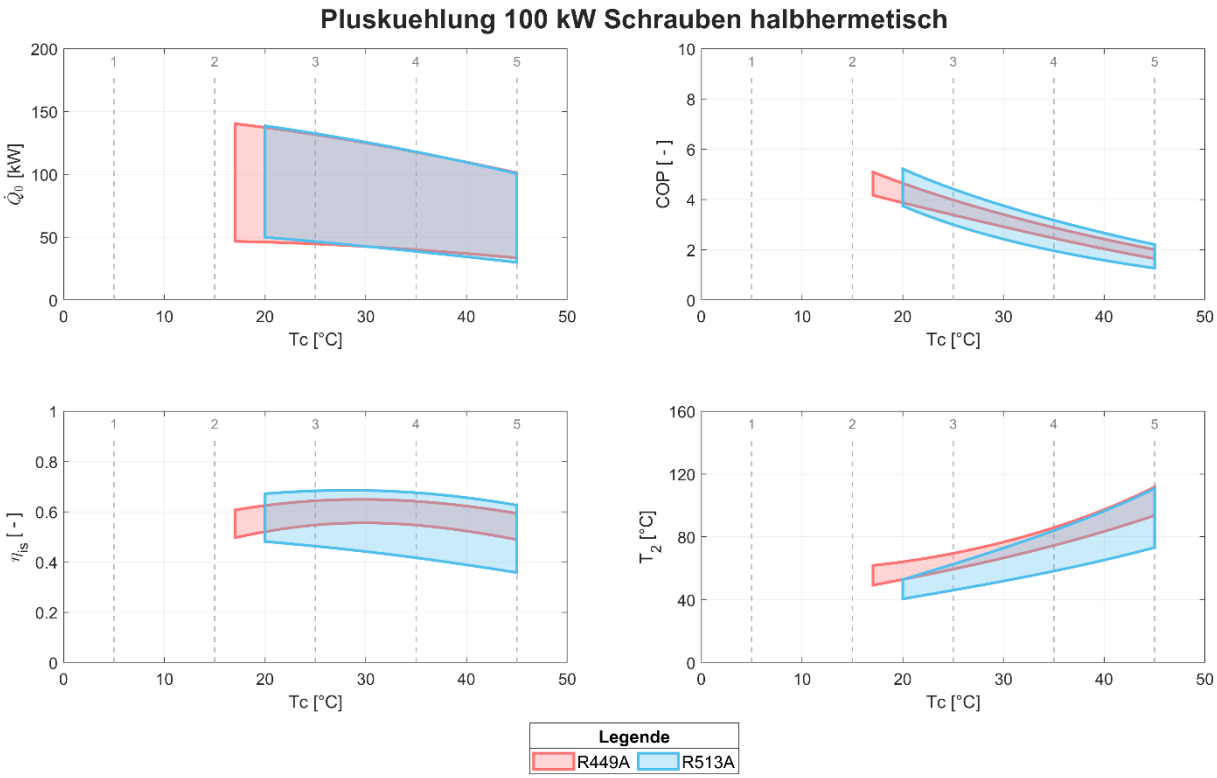

Pluskuehlung 10 kW Kolben hermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
R449A
R513A


Pluskuehlung 10 kW Scroll hermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
R449A
R513A

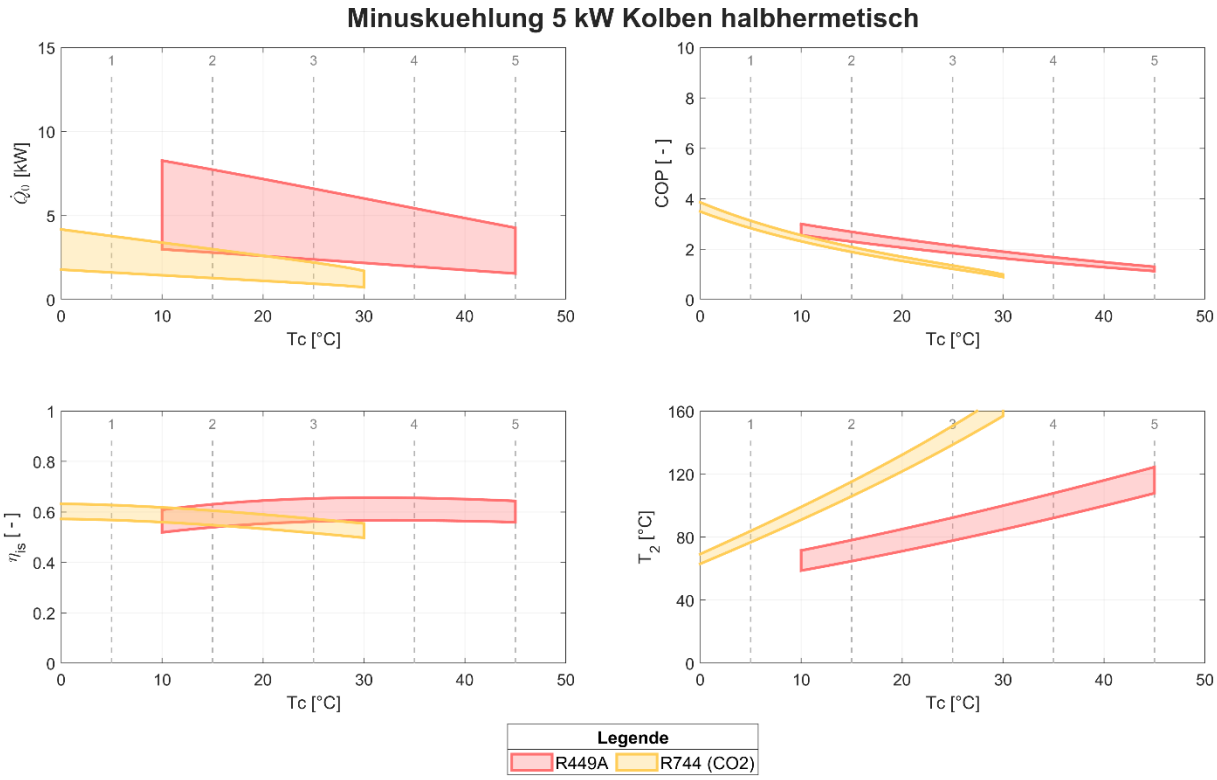

Pluskuehlung 50 kW Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
R449A
R513A
R744 (CO2)

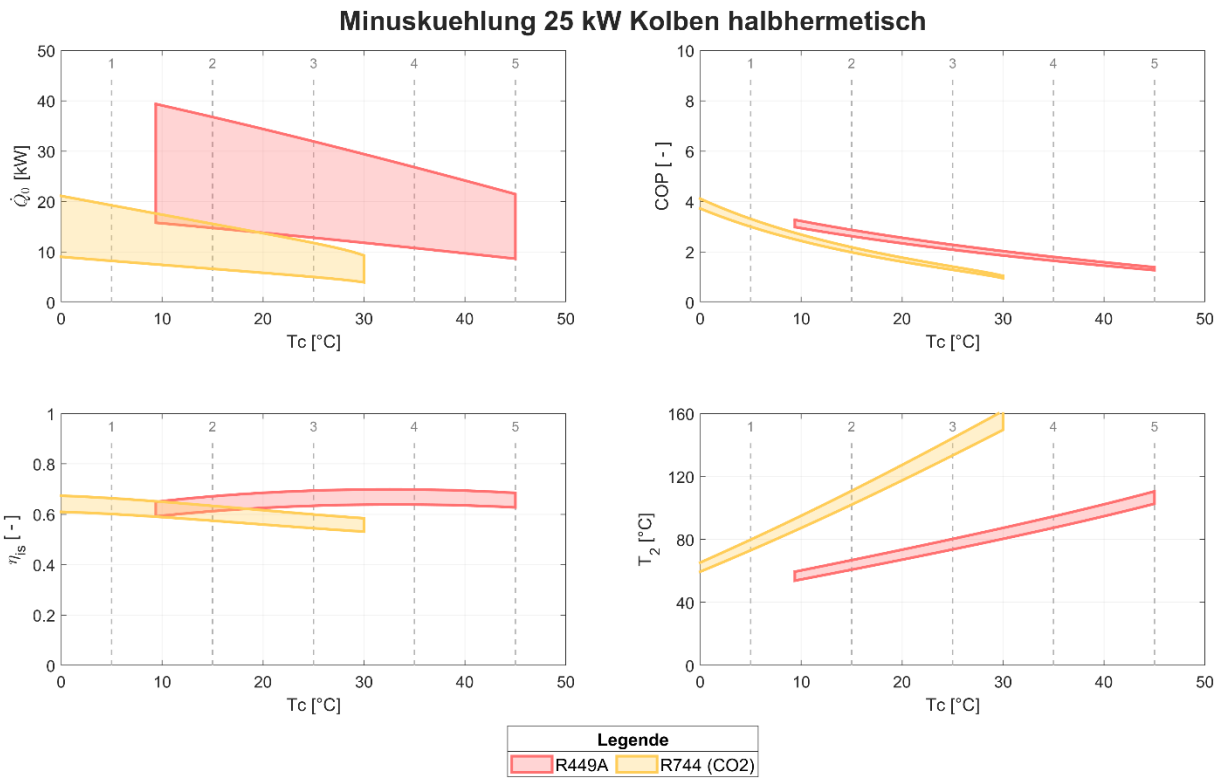

Pluskuehlung 50 kW Schrauben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
R449A
R513A

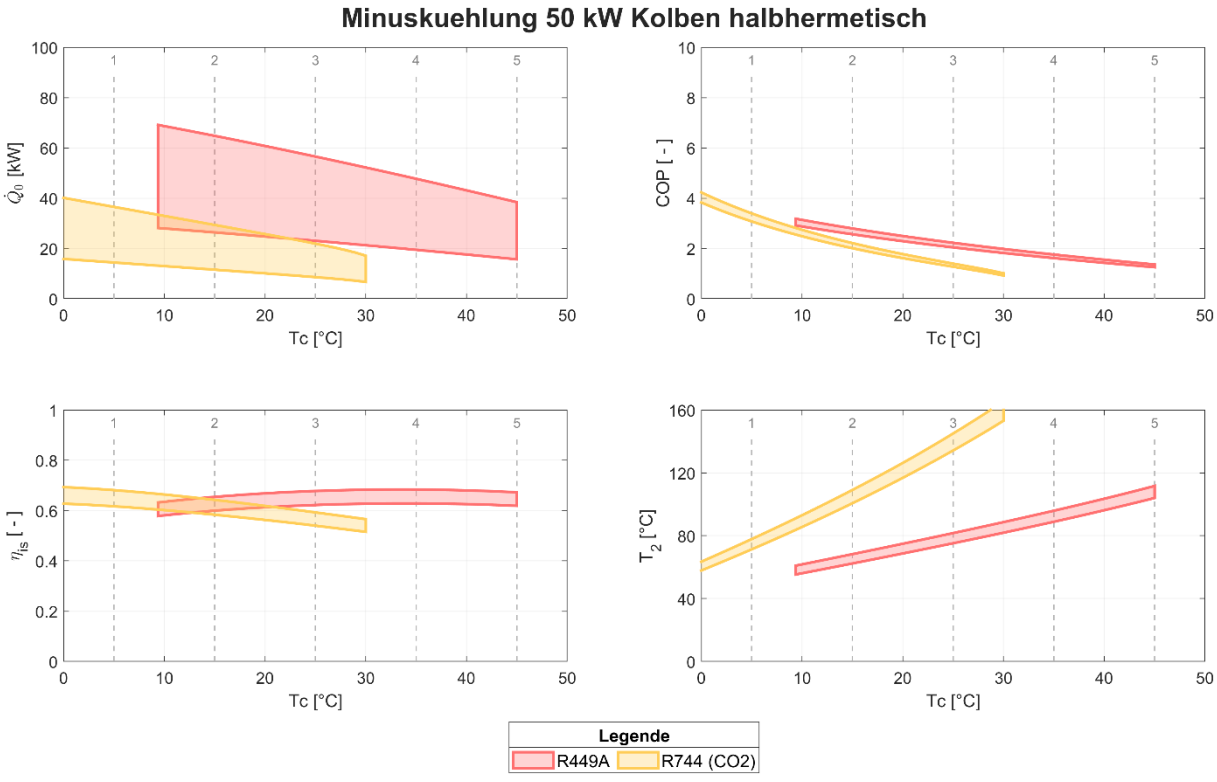

Pluskuehlung 100 kW Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
R449A
R513A
R744 (CO2)



A.2.3 Vergleich Kältemittel - Minuskühlung

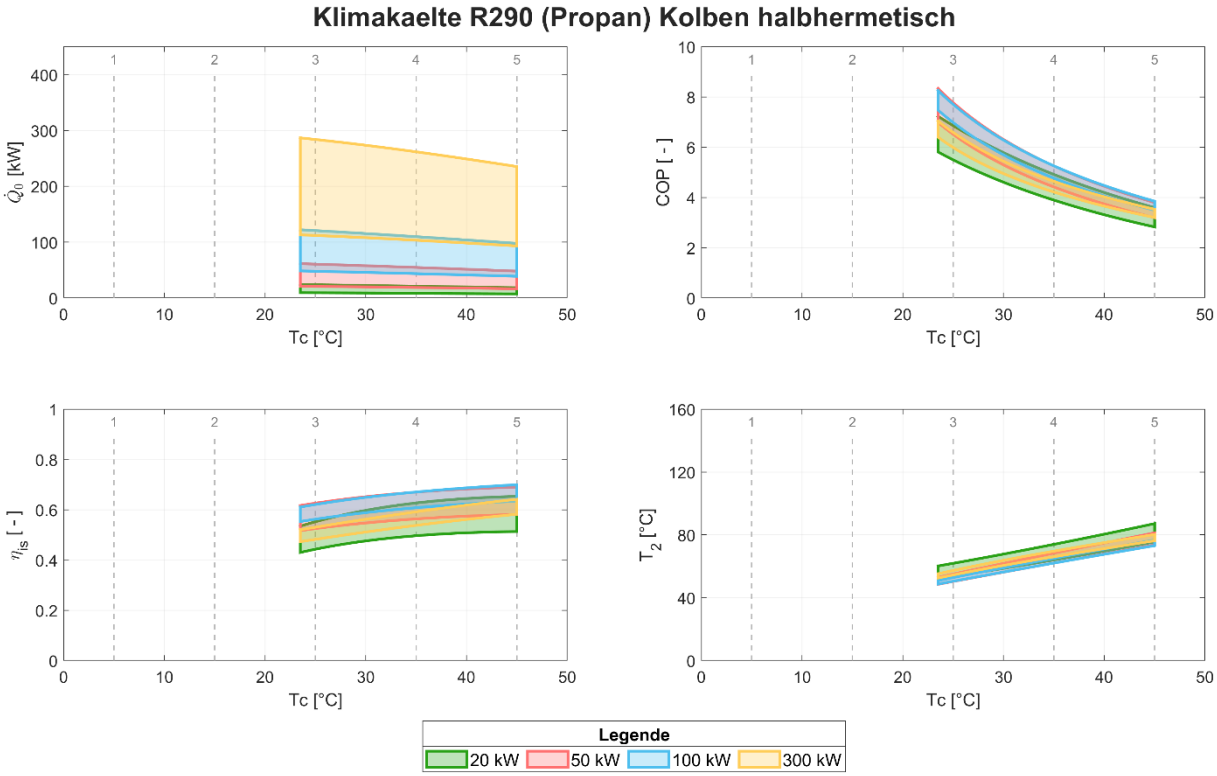


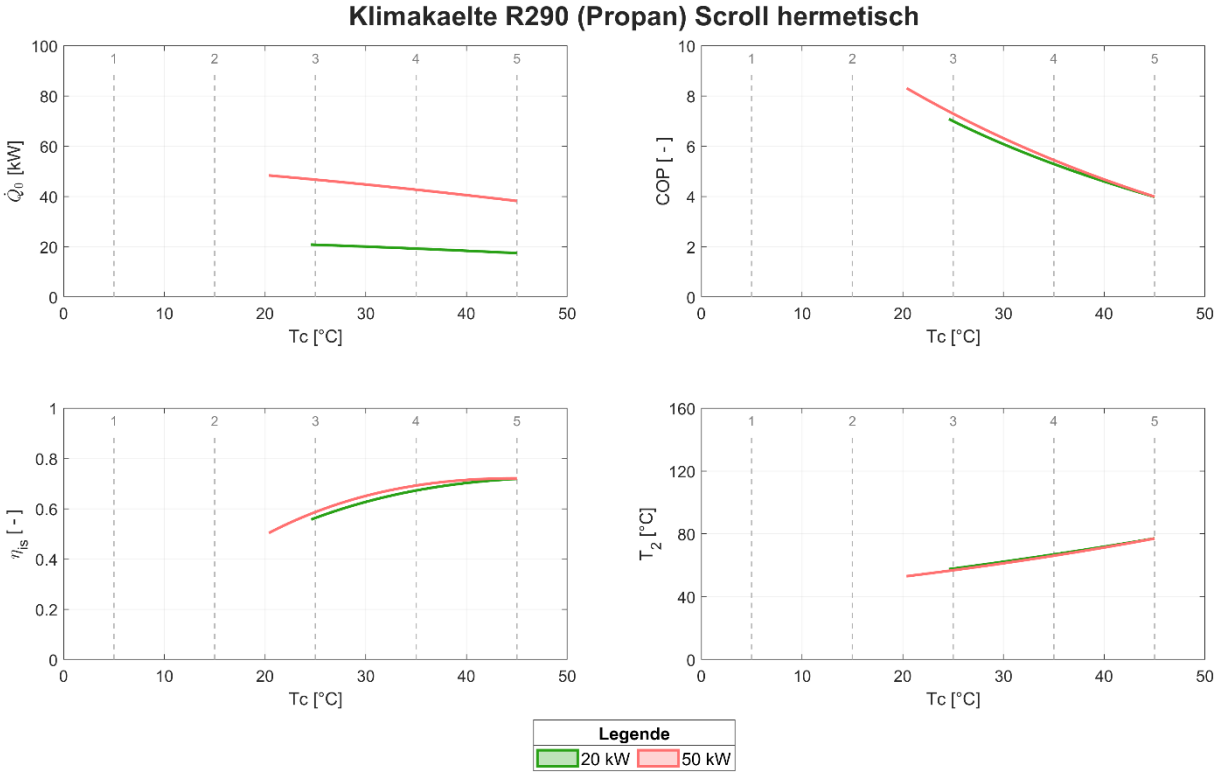

Minuskuehlung 25 kW Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
R449A
R744 (CO2)

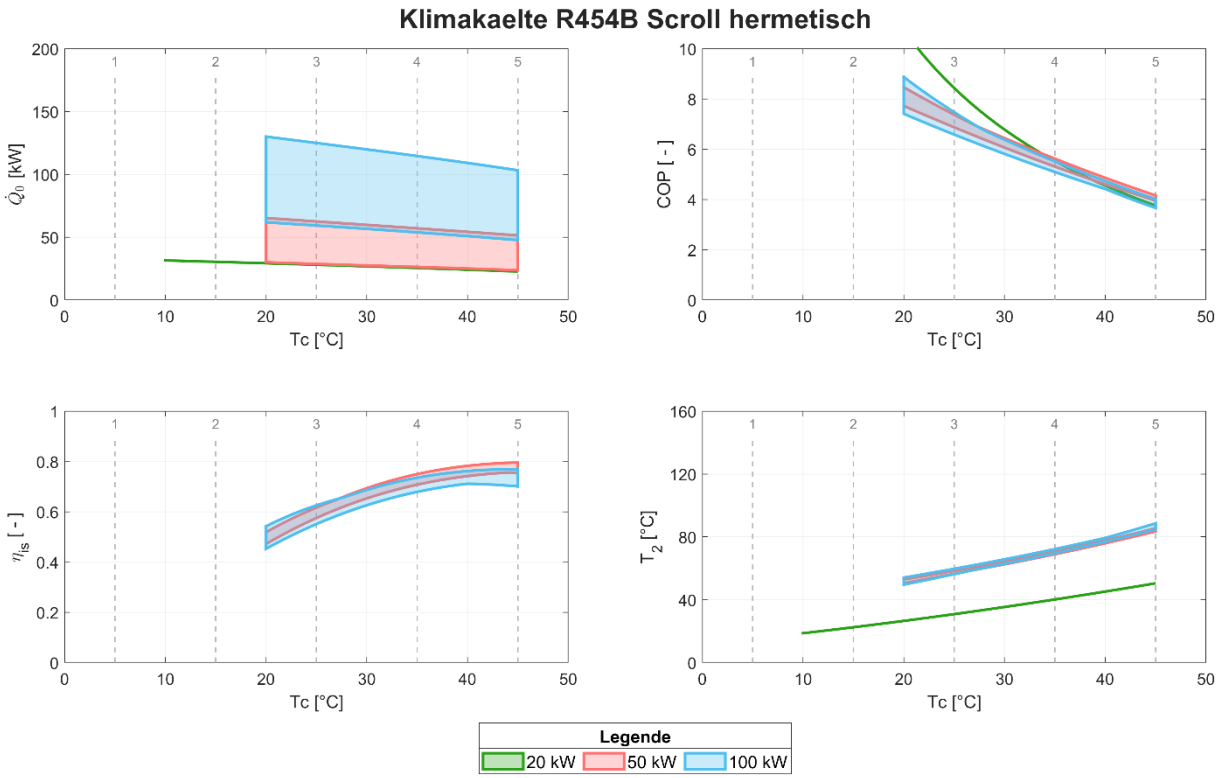

Minuskuehlung 50 kW Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
R449A
R744 (CO2)

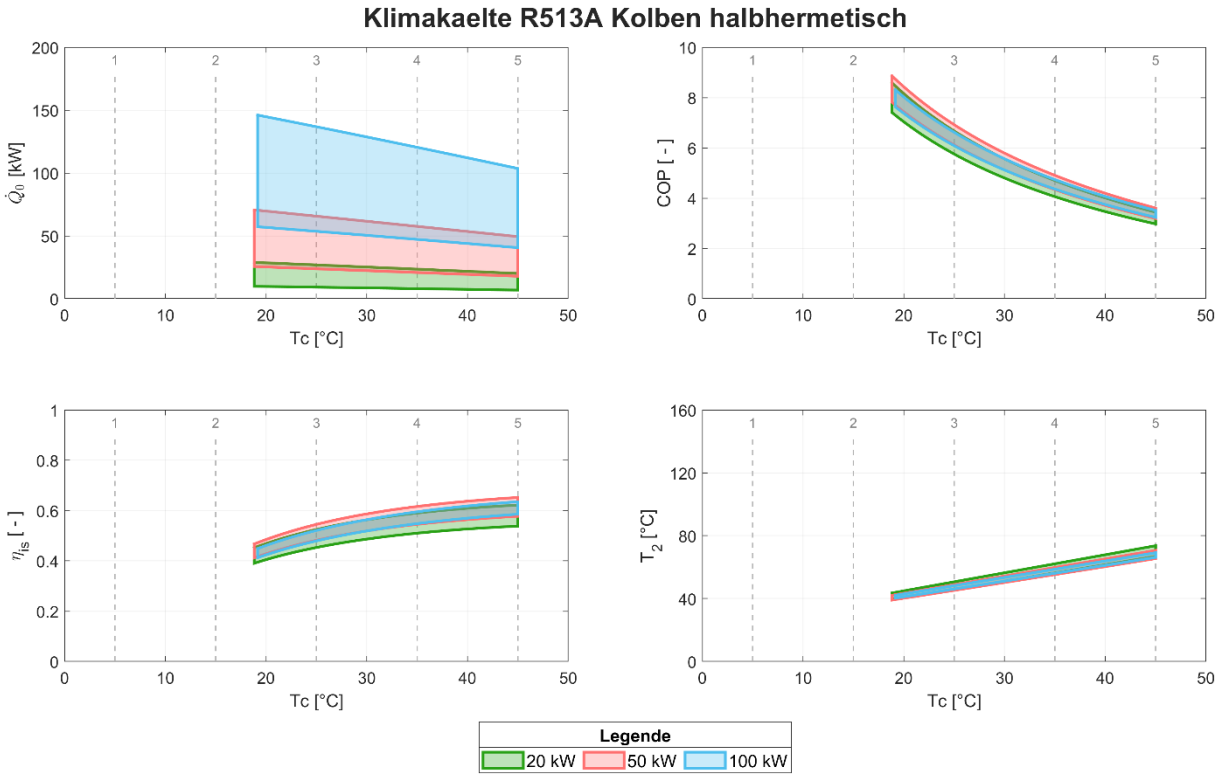
A.3 Vergleich Baugrössen

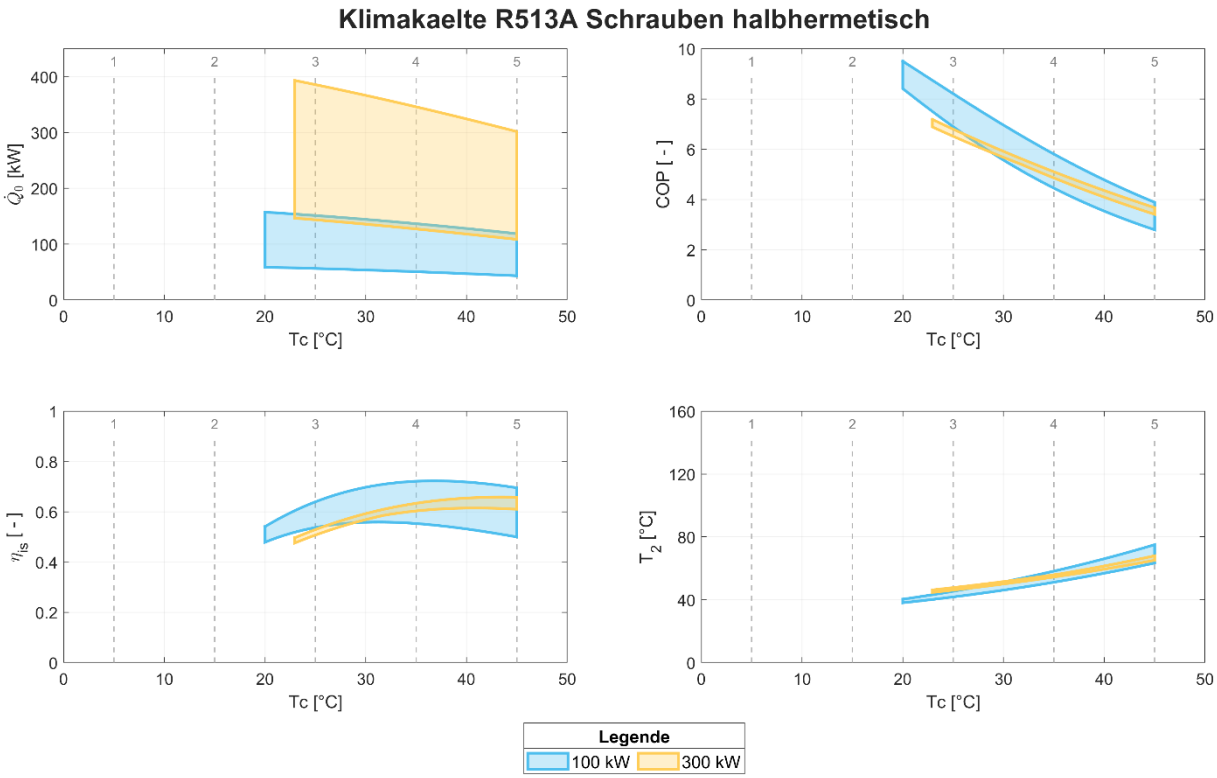
A.3.1 Vergleich Baugrössen - Klimakälte

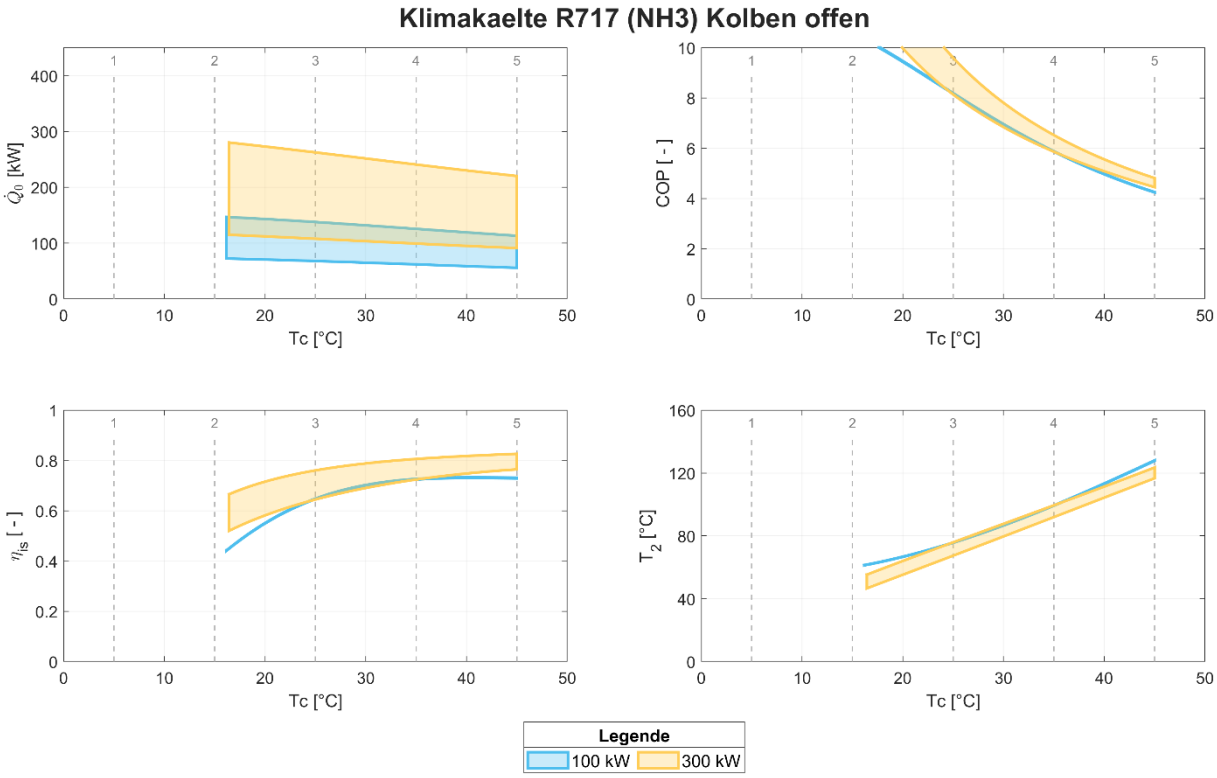


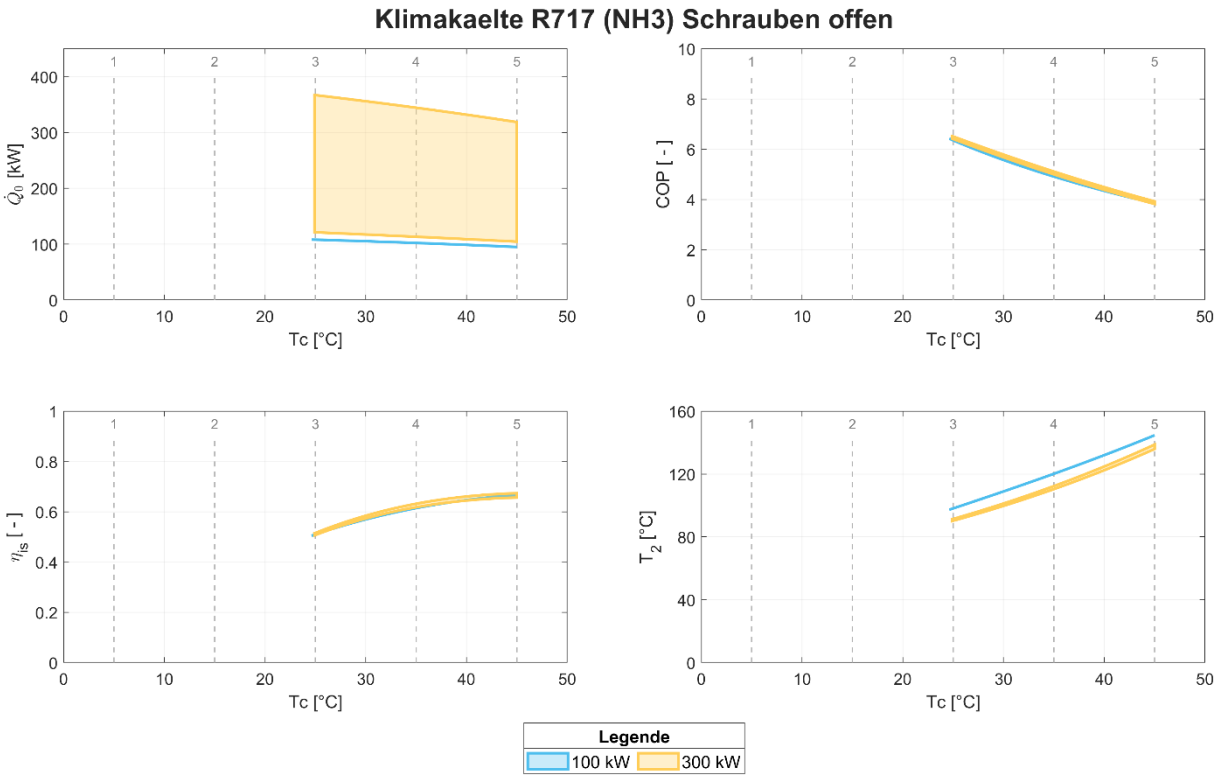


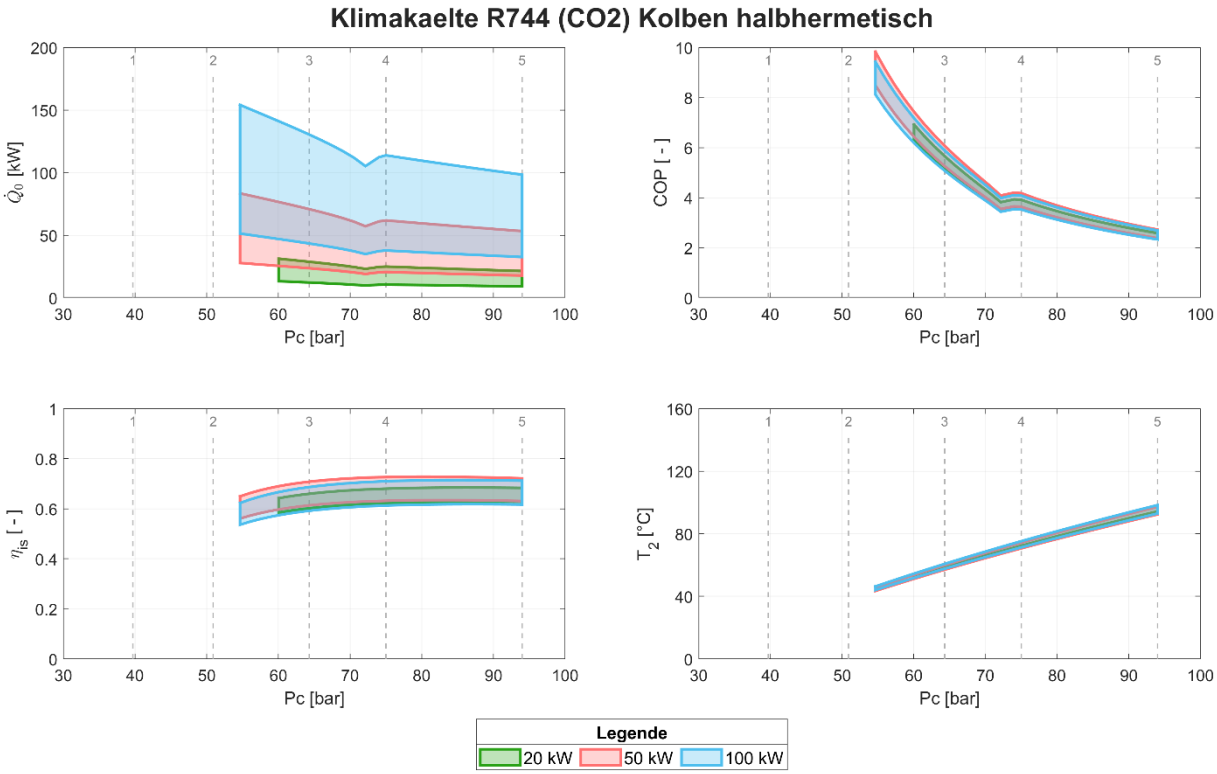

Klimakaelte R454B Scroll hermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
20 kW
50 kW
100 kW

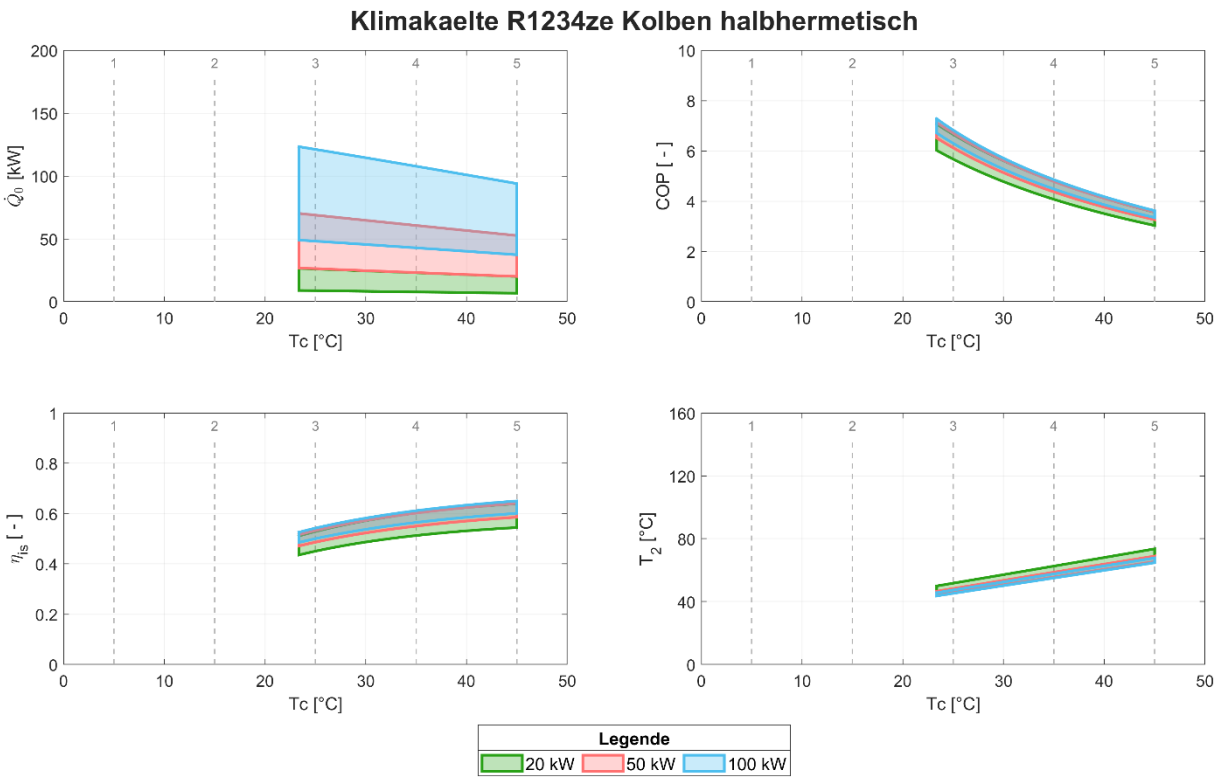

Klimakaelte R513A Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
20 kW
50 kW
100 kW

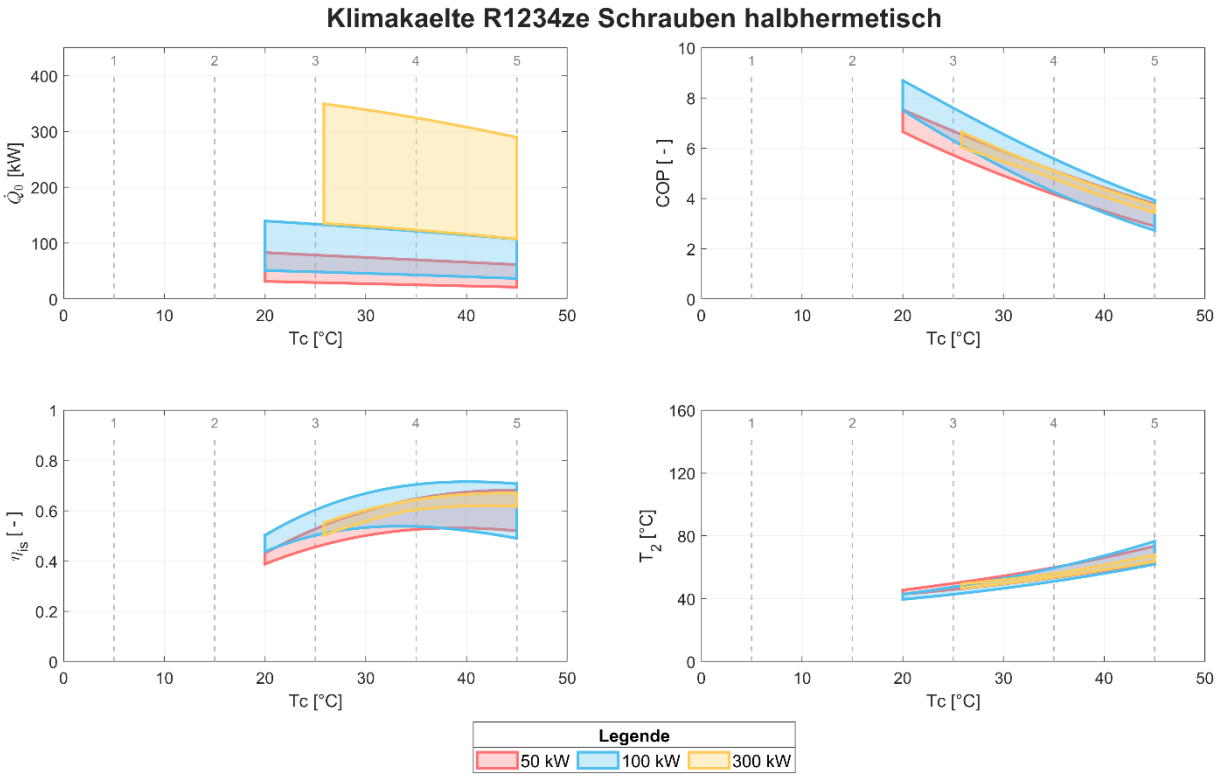

Klimakaelte R513A Schrauben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
100 kW
300 kW


Klimakaelte R717 (NH3) Kolben offen
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
100 kW
300 kW

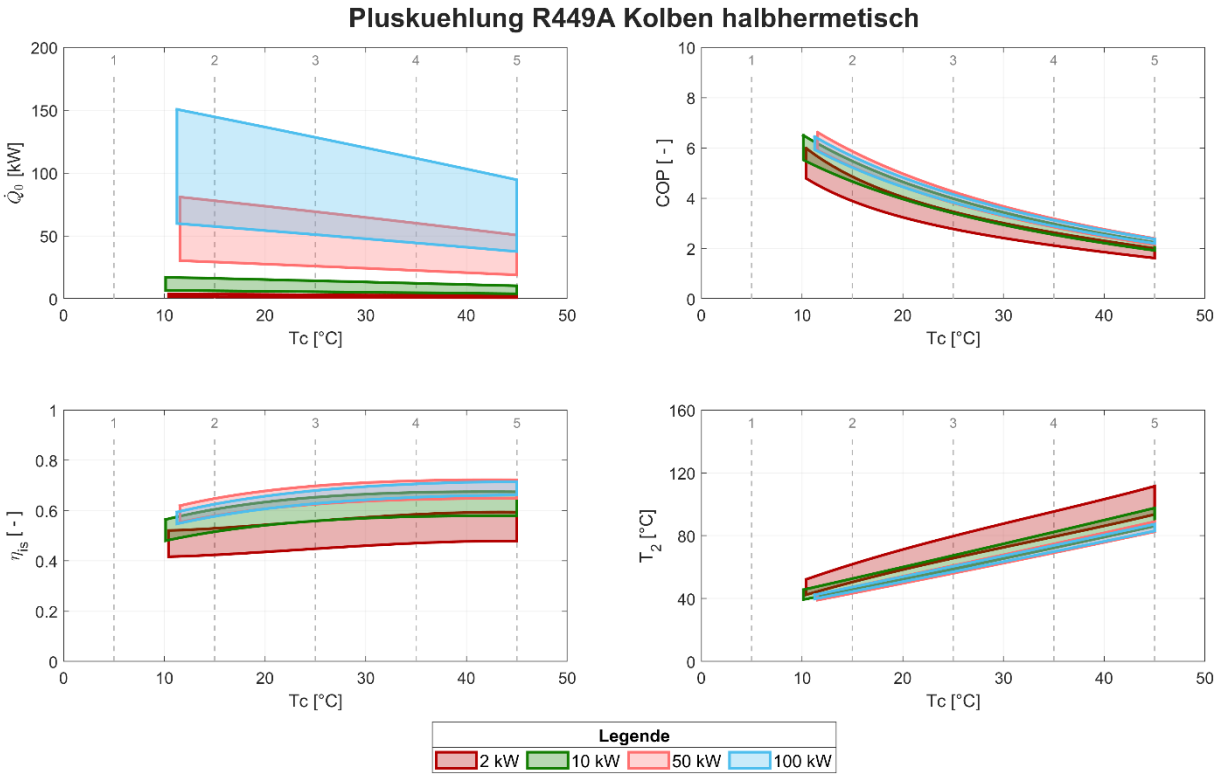

Klimakaelte R717 (NH3) Schrauben offen
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
100 kW
300 kW

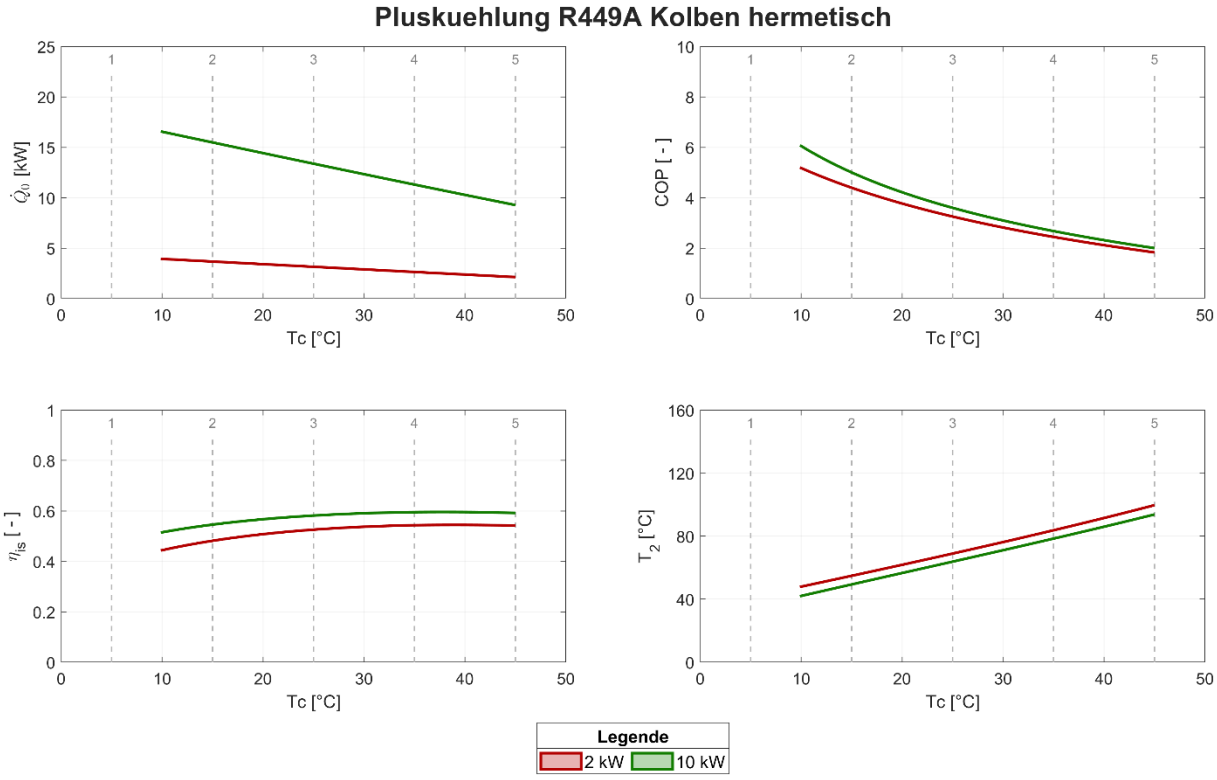

Klimakaelte R744 (CO2) Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Pc [bar]
Legende
20 kW
50 kW
100 kW

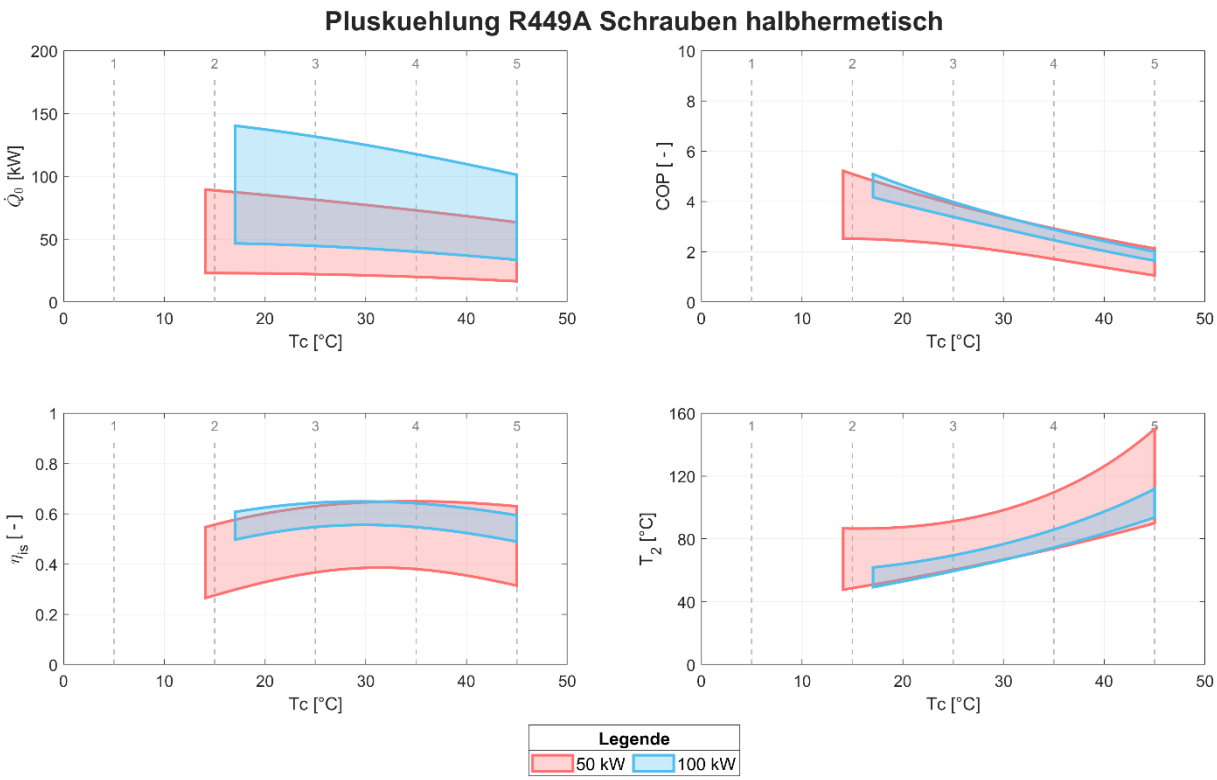

Klimakaelte R1234ze Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
20 kW
50 kW
100 kW

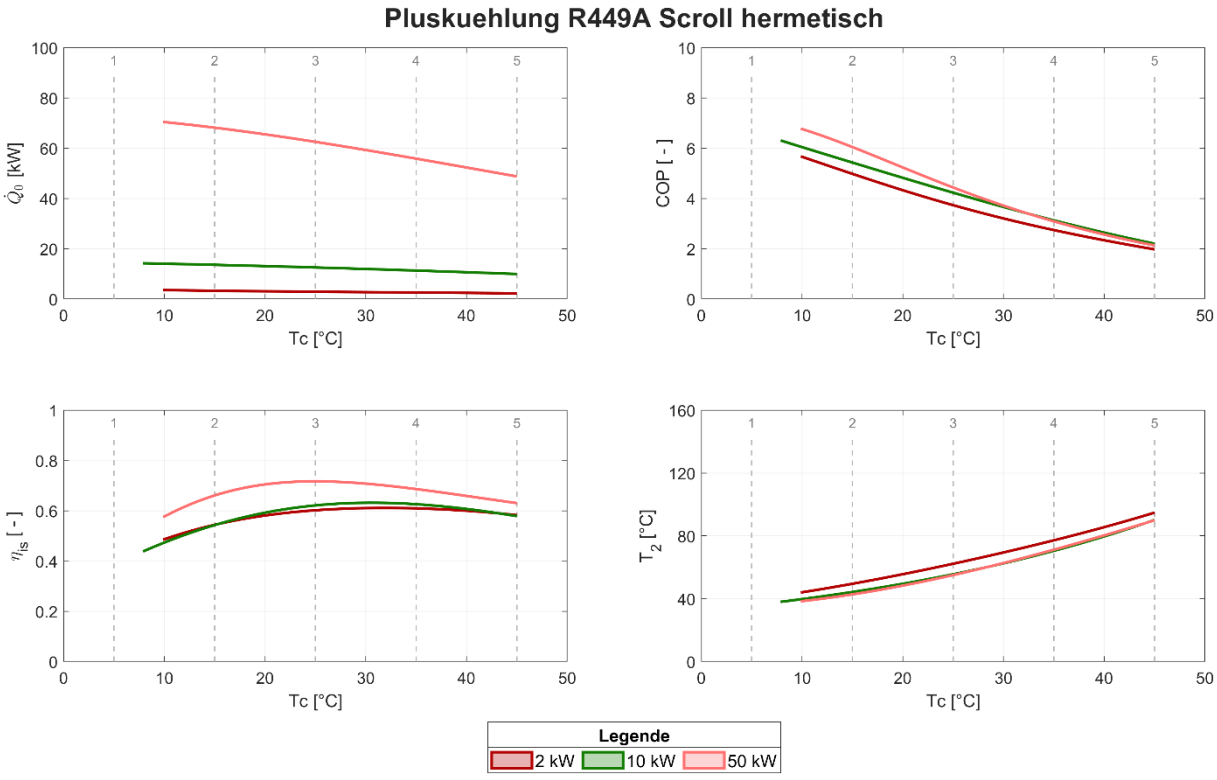

Klimakaelte R1234ze Schrauben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
50 kW
100 kW
300 kW

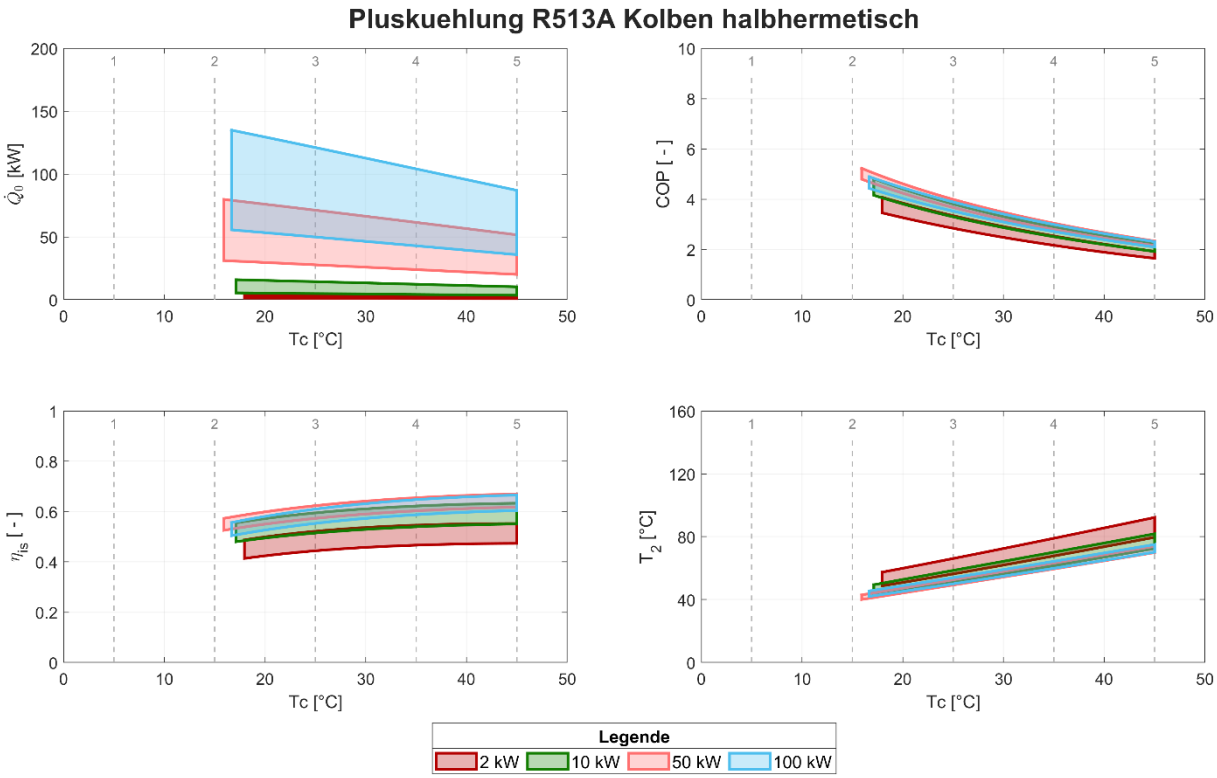
A.3.2 Vergleich Baugrössen - Pluskühlung

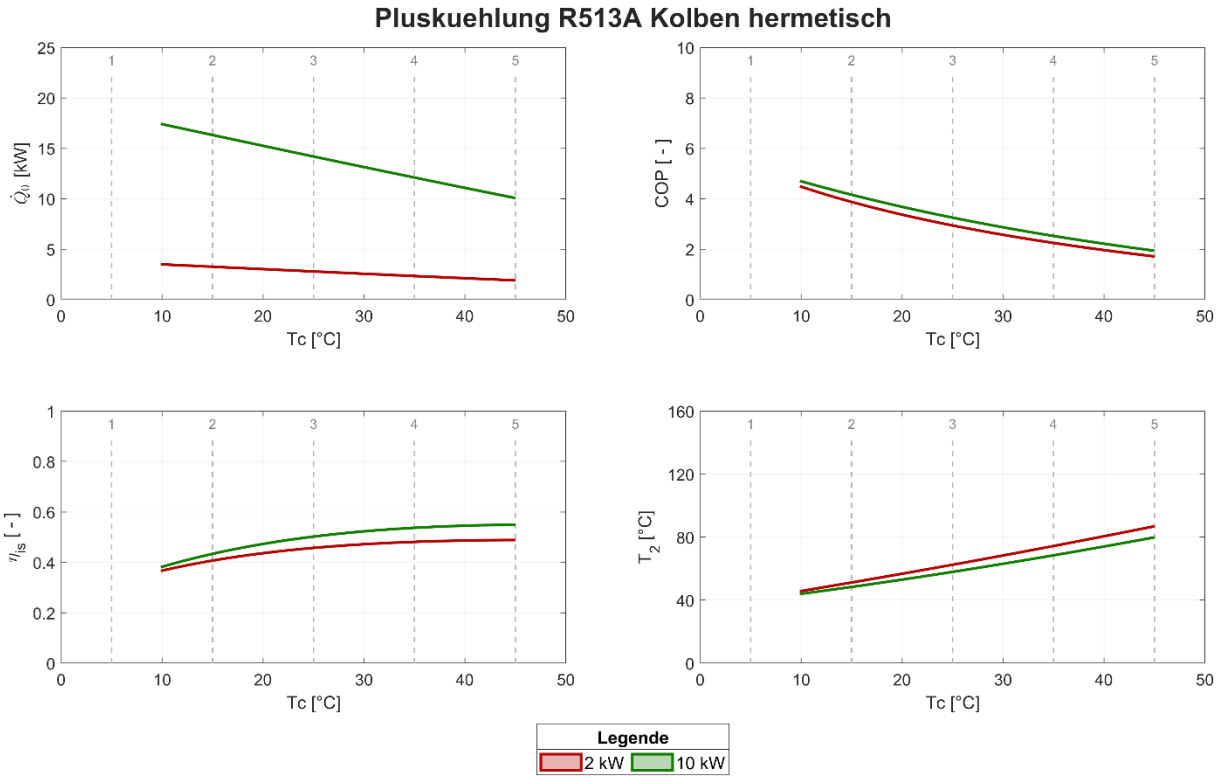


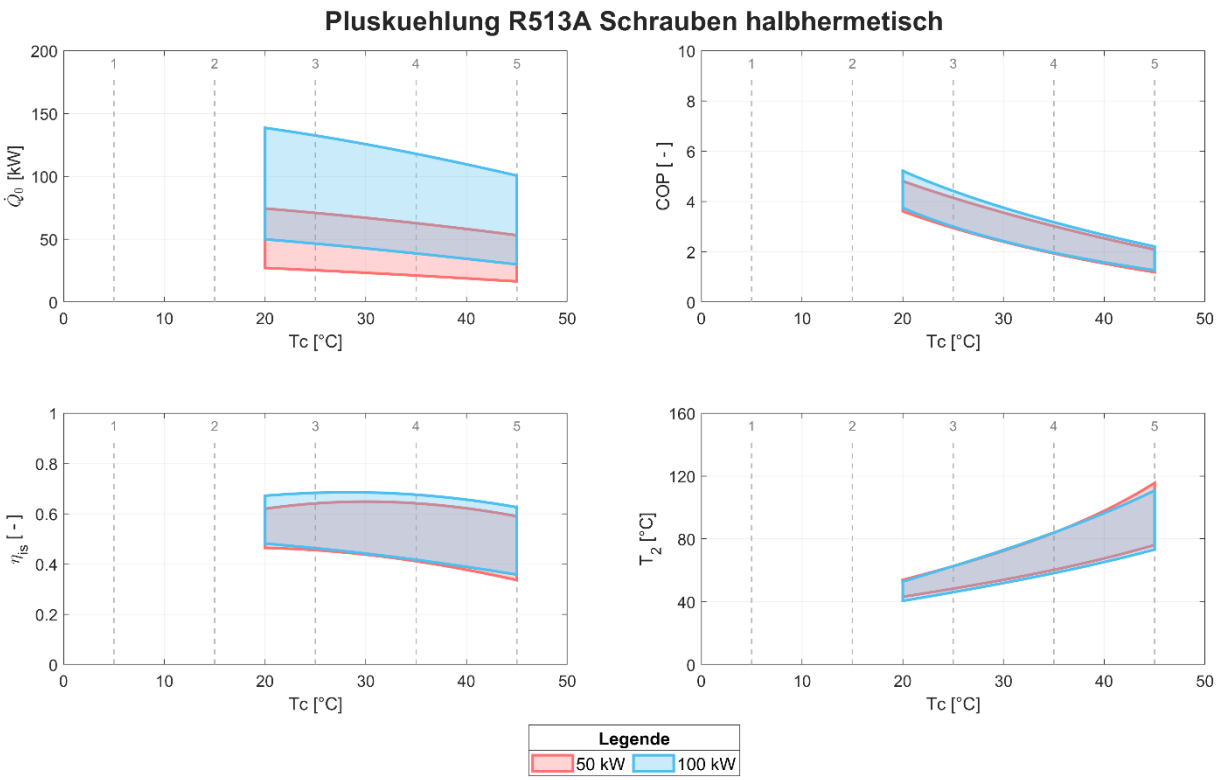


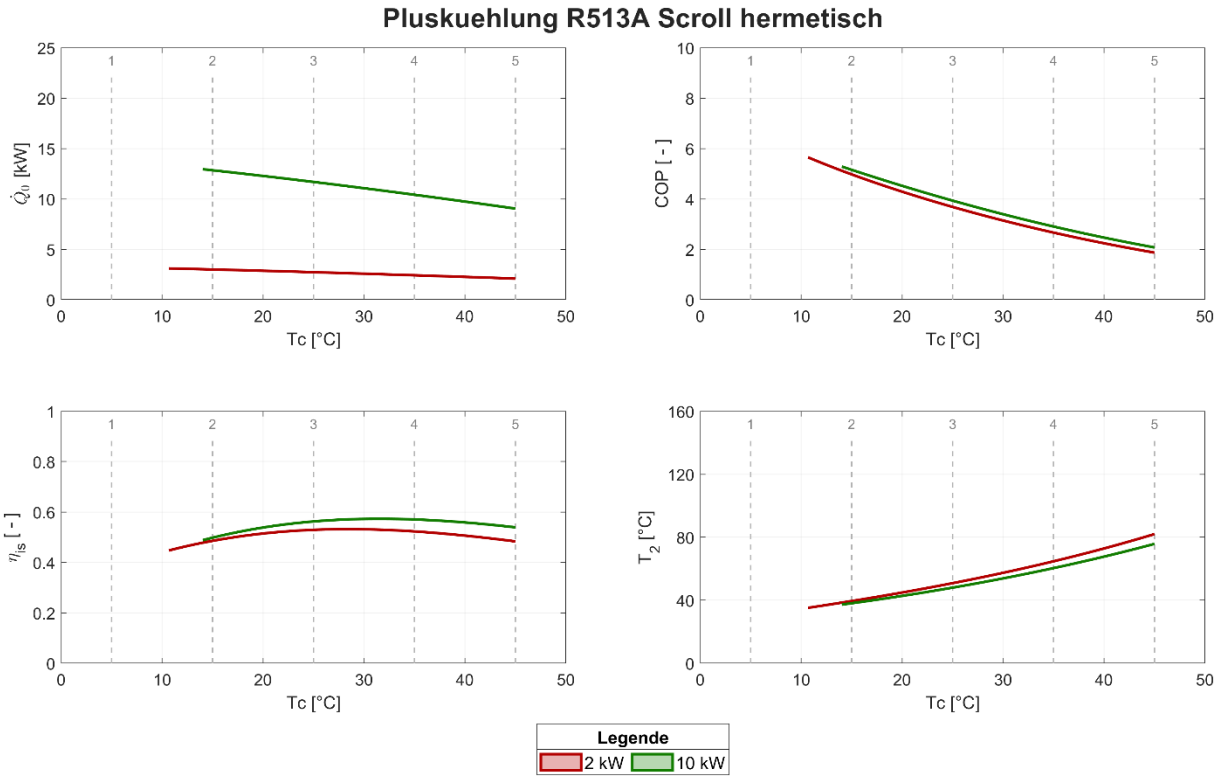

Pluskuehlung R449A Schrauben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
50 kW
100 kW

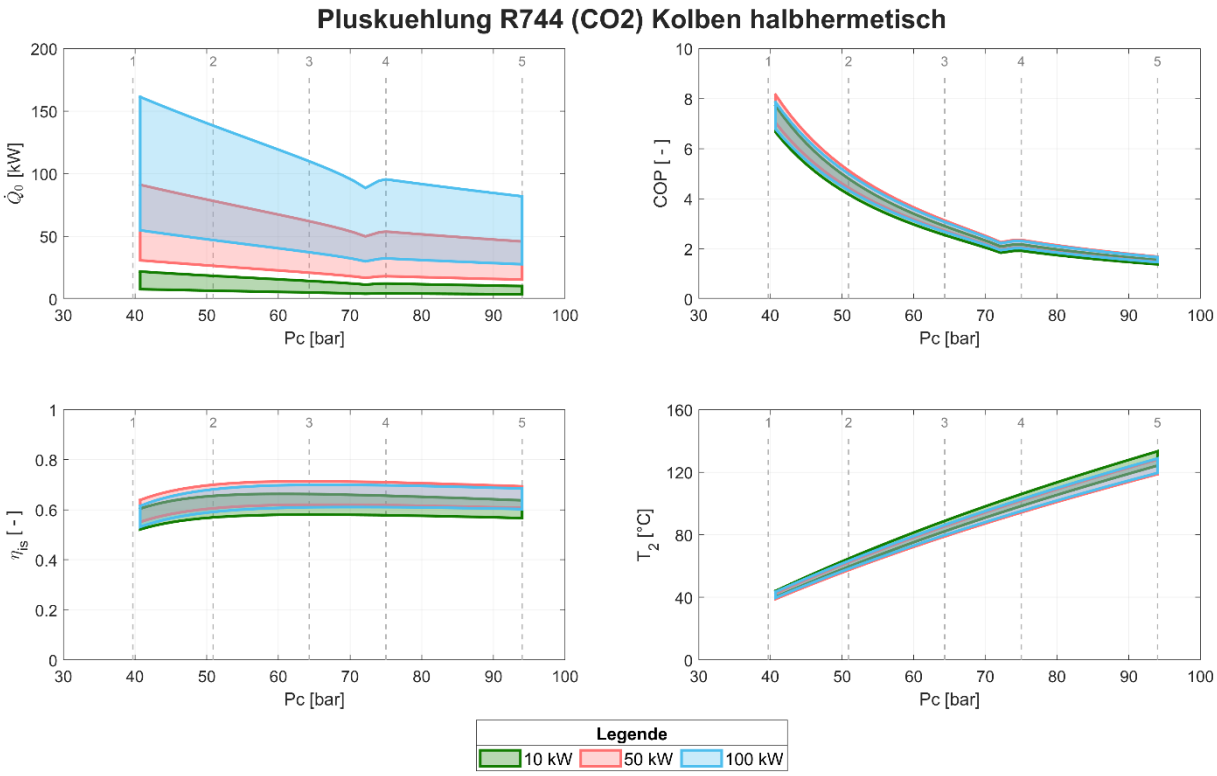

Pluskuehlung R449A Scroll hermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
2 kW
10 kW
50 kW


Pluskuehlung R513A Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
2 kW
10 kW
50 kW
100 kW

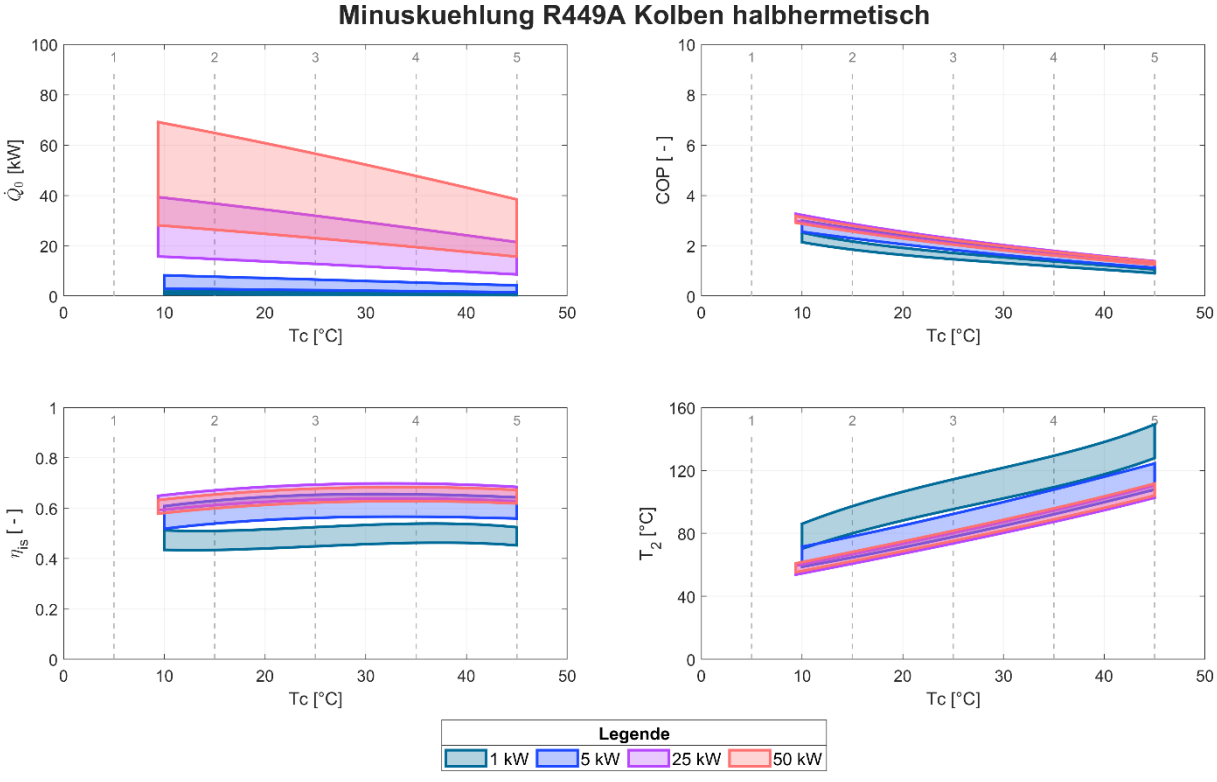

Pluskuehlung R513A Kolben hermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
2 kW
10 kW

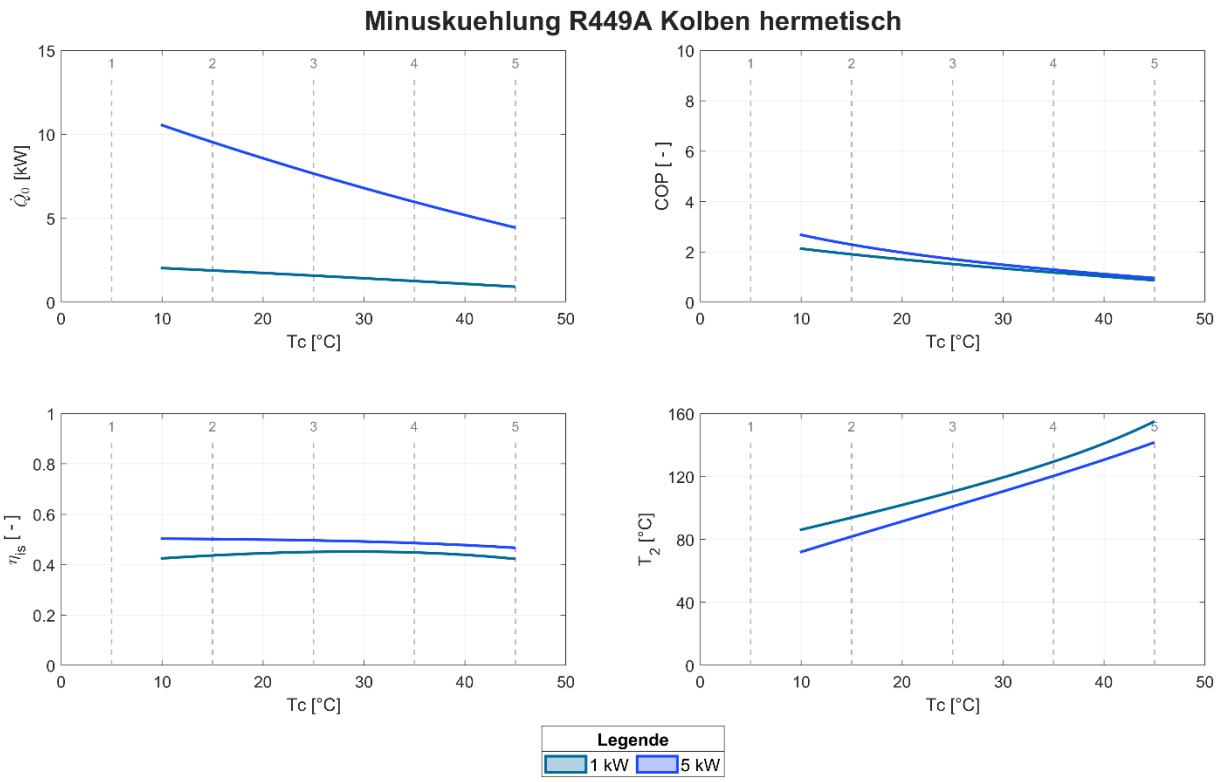

Pluskuehlung R513A Schrauben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
50 kW
100 kW

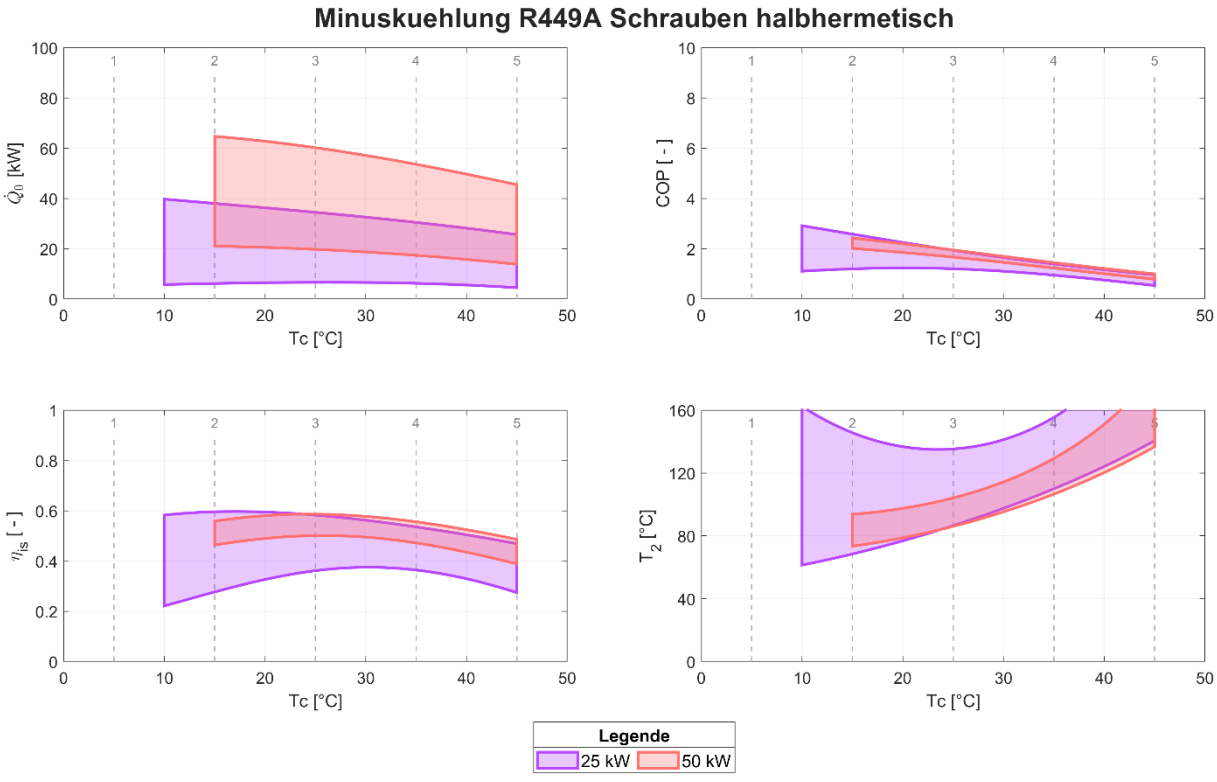

Pluskuehlung R513A Scroll hermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
2 kW
10 kW

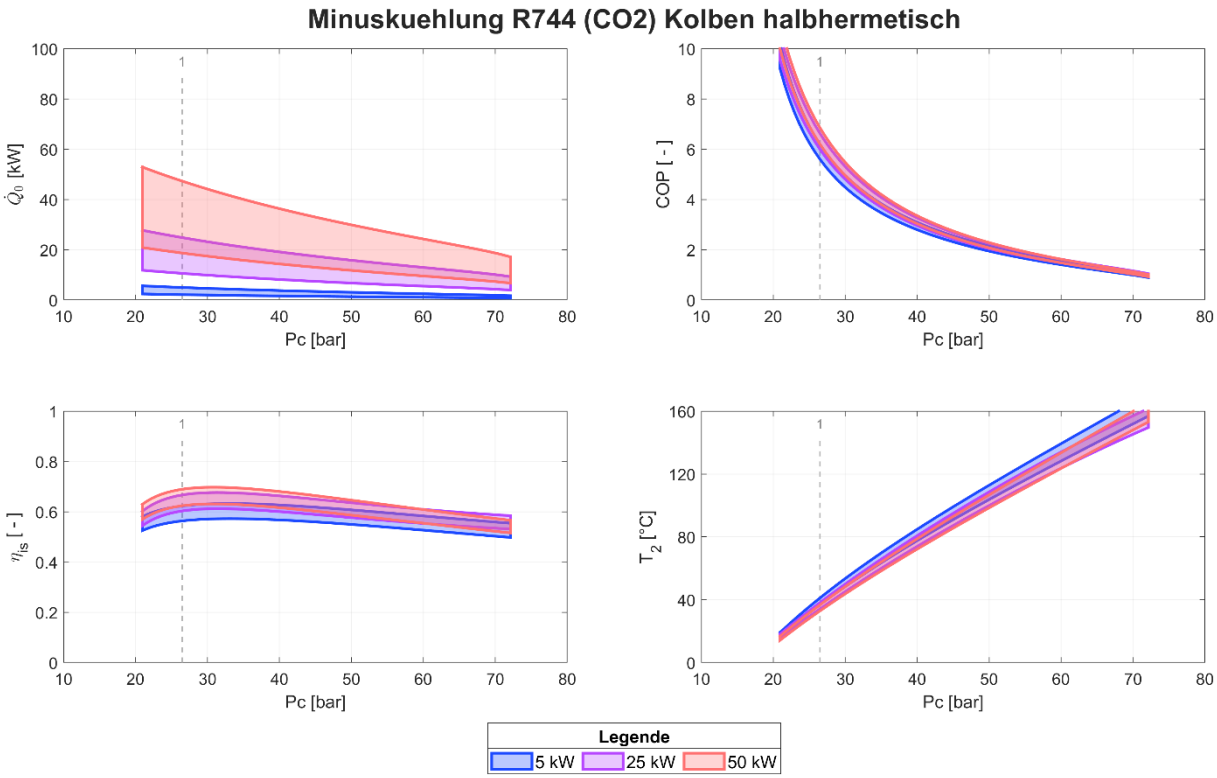


A.3.3 Vergleich Baugrössen - Minuskühlung



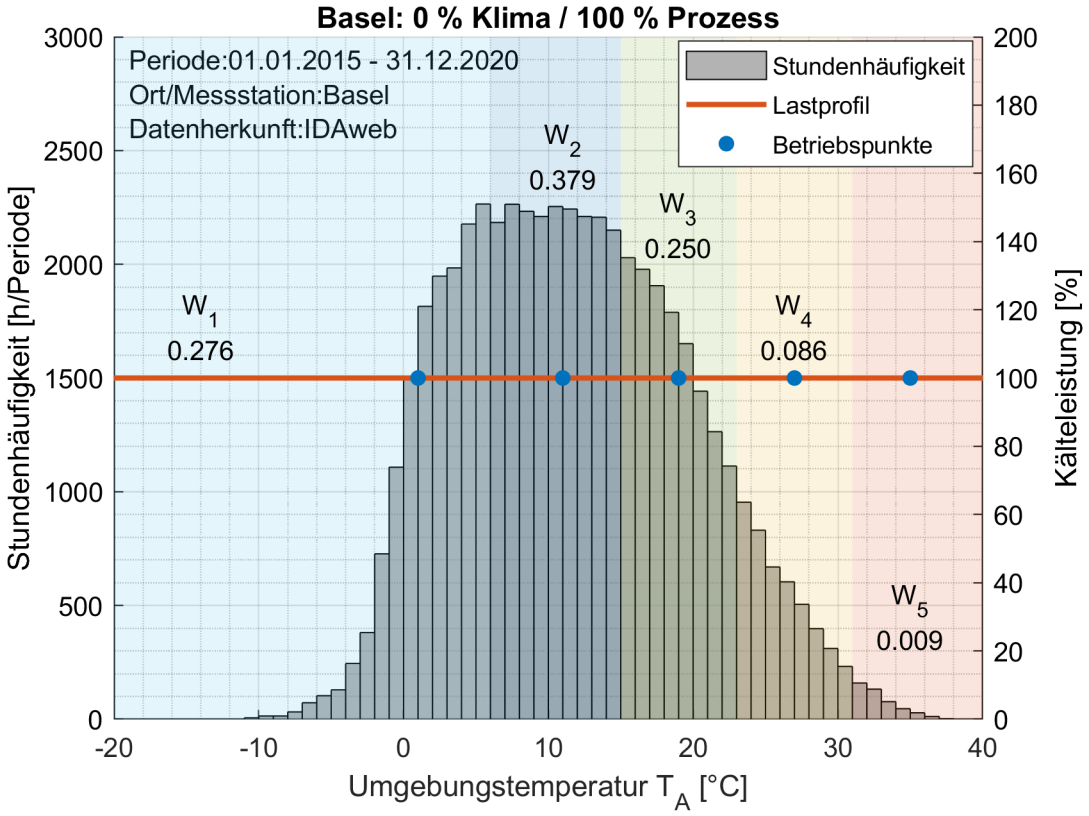

Minuskuehlung R449A Kolben hermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
1 kW
5 kW

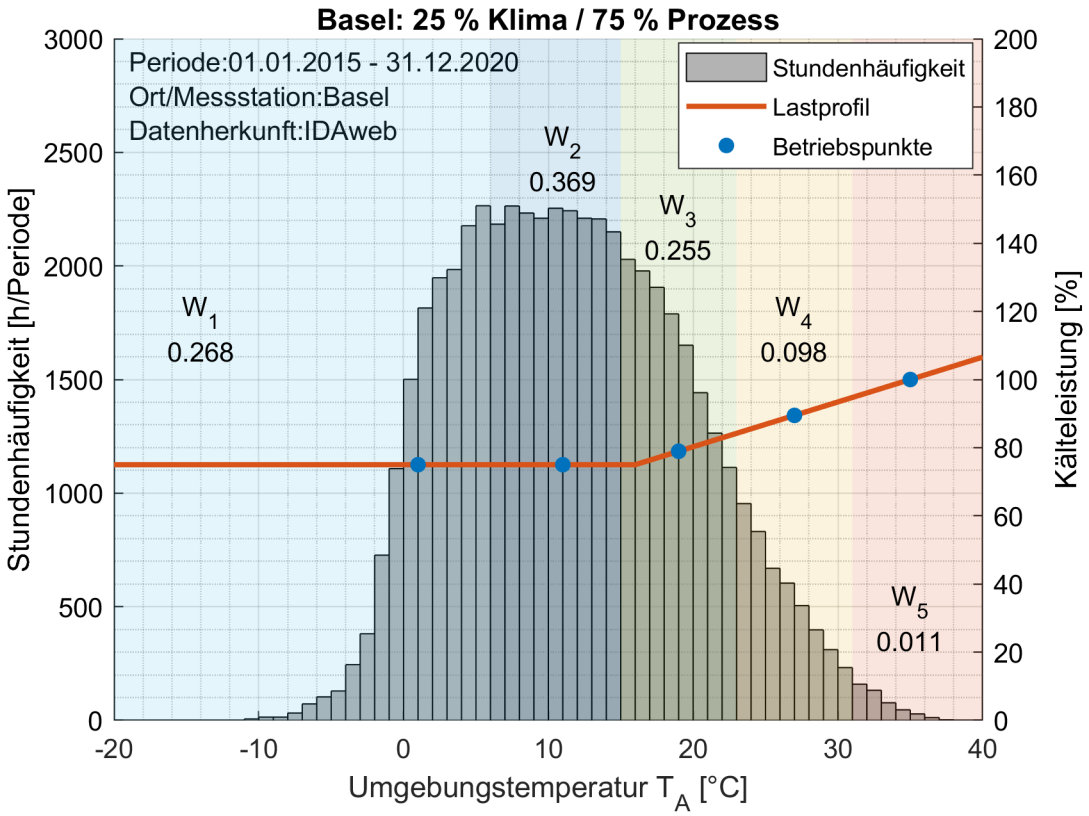

Minuskuehlung R449A Schrauben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
25 kW
50 kW

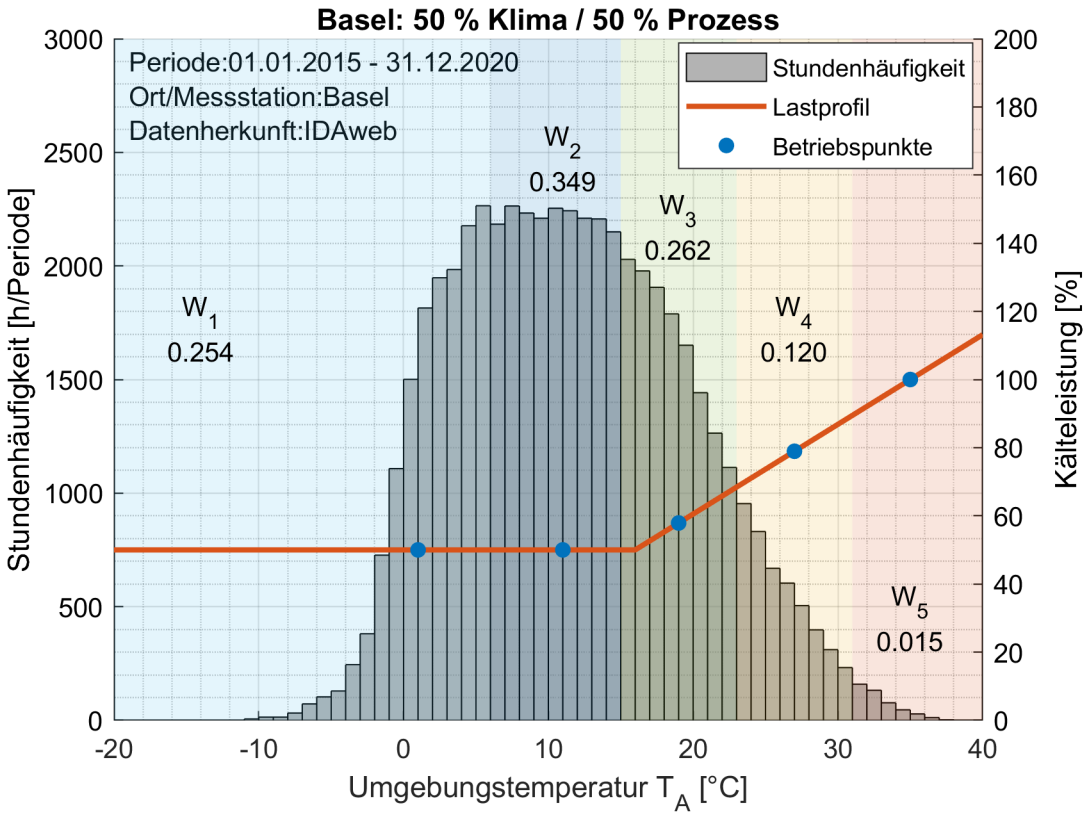

Minuskuehlung R744 (CO2) Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Pc [bar]
Legende
5 kW
25 kW
50 kW

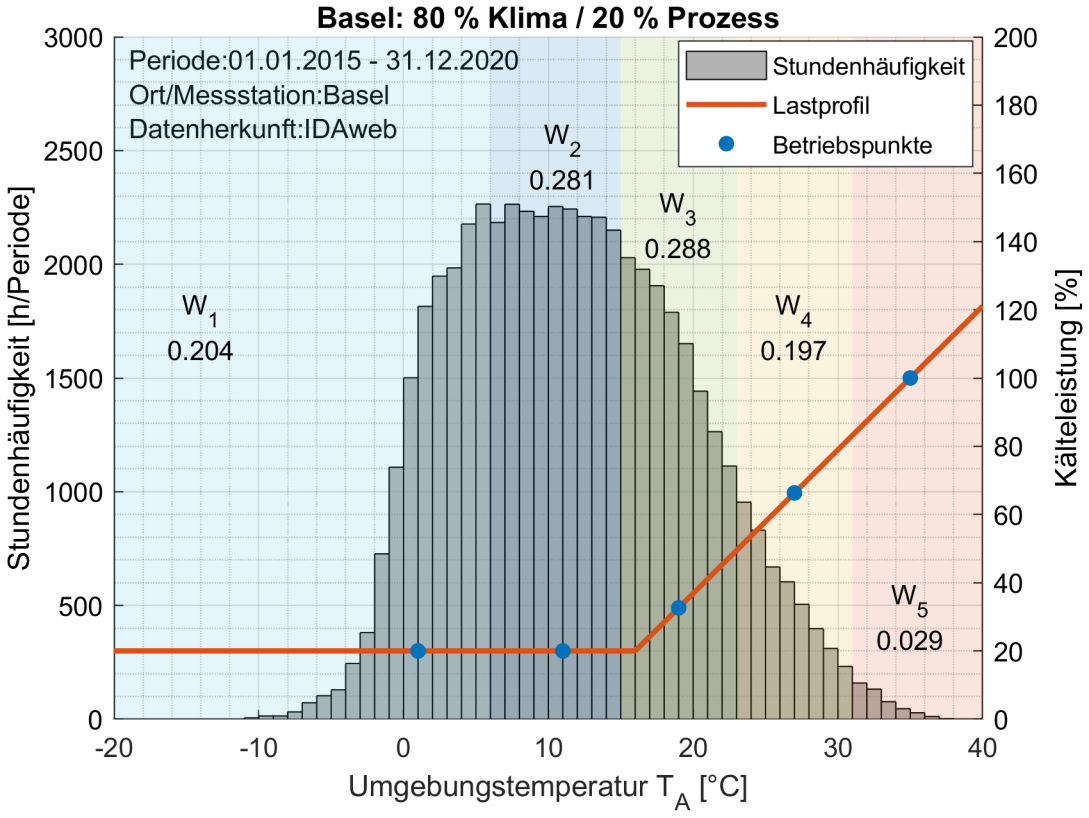
B. Anhang – Gewichtungsfaktoren

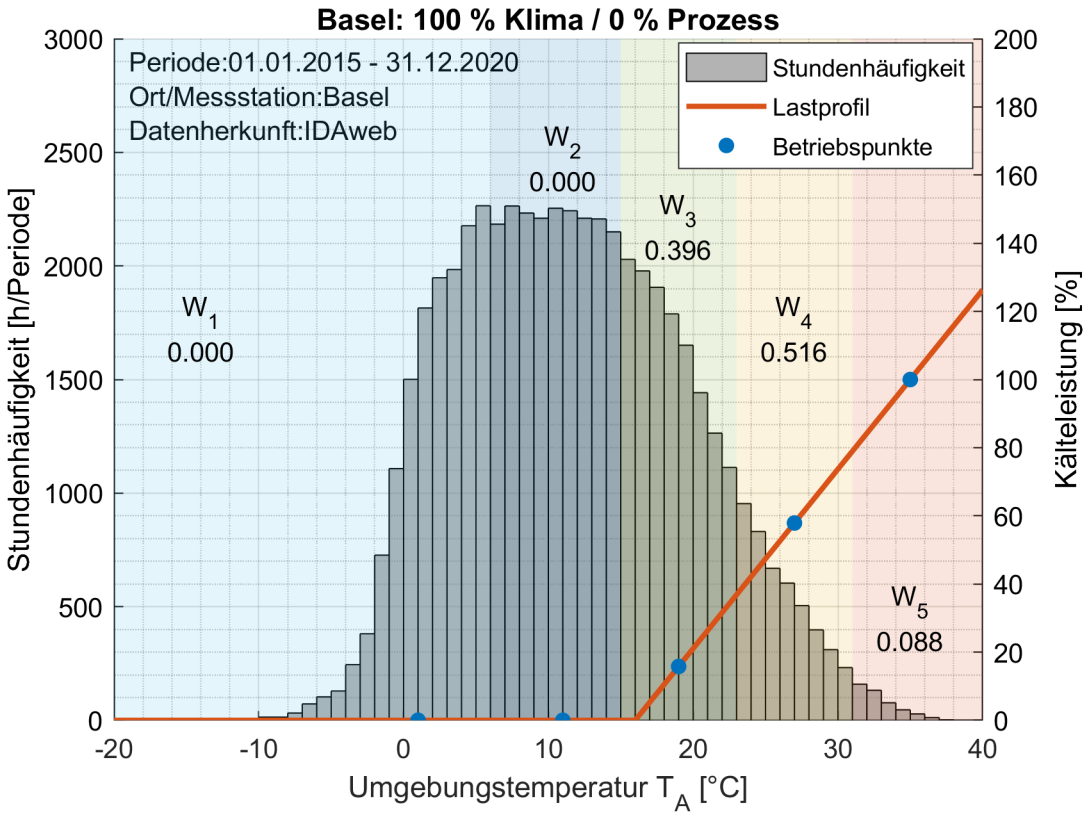
B.1 Gewichtungsfaktoren Standorte und Lastprofile

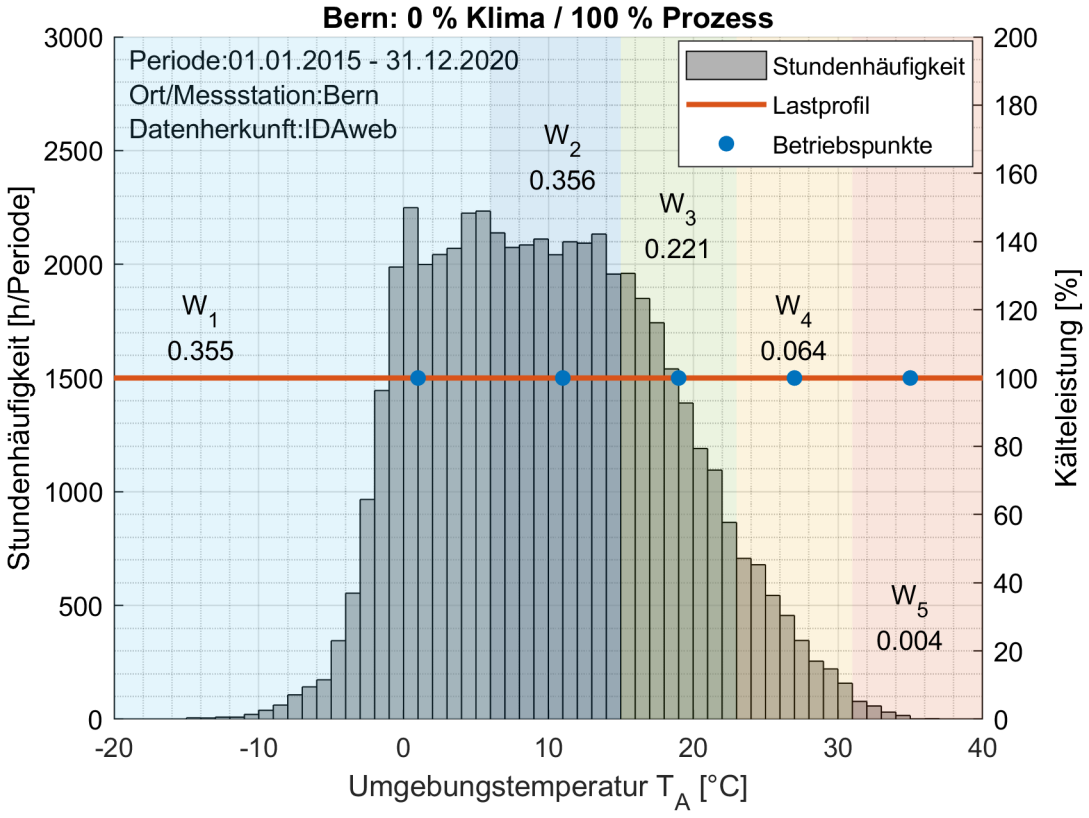


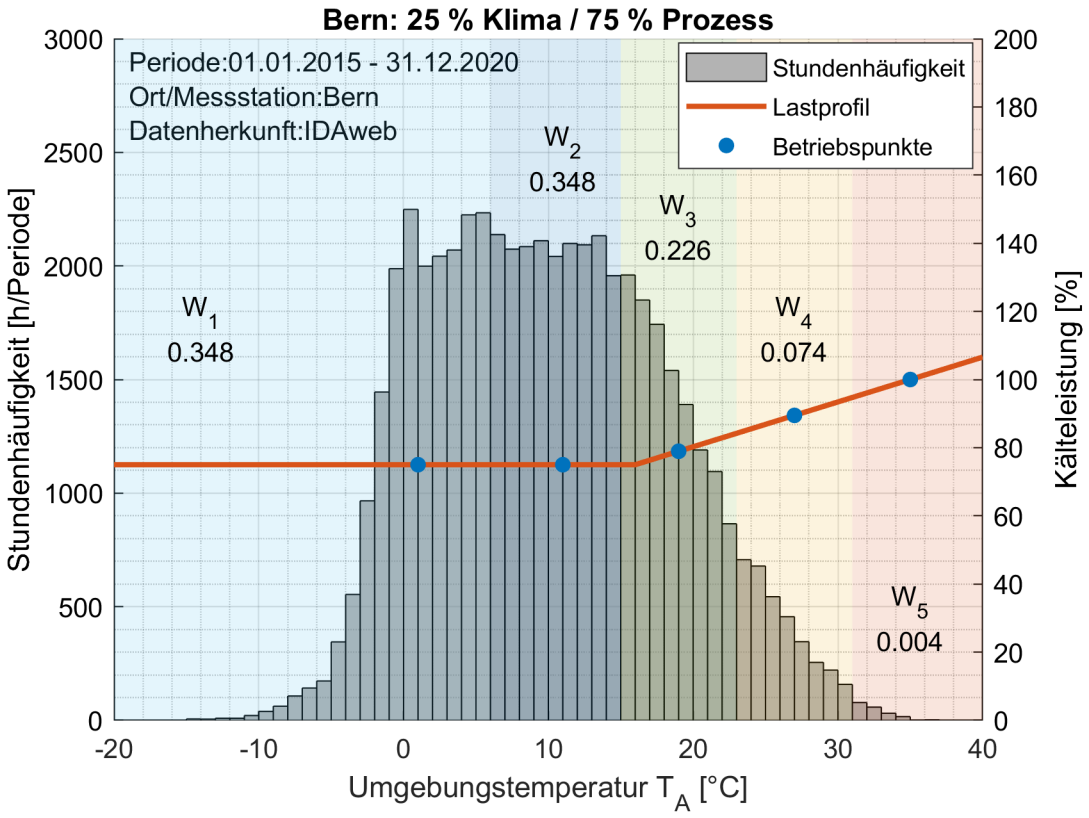


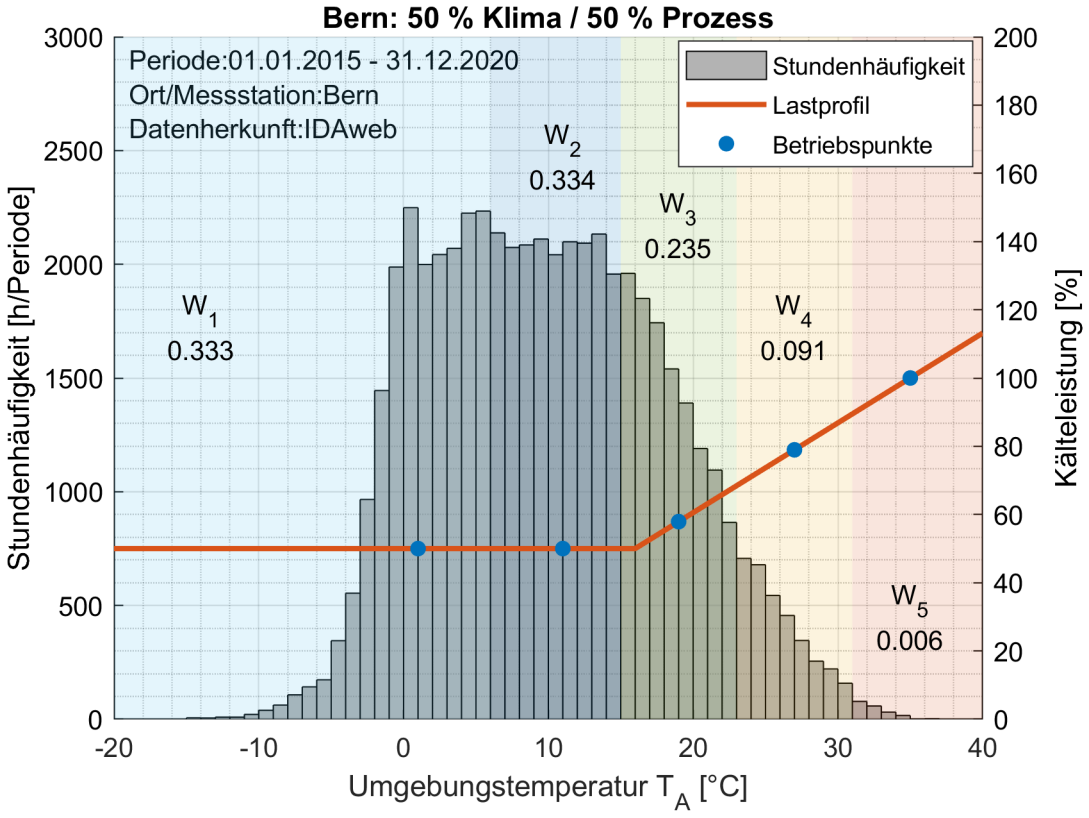

Basel: 50 % Klima / 50 % Prozess
Periode:01.01.2015 - 31.12.2020
Ort/Messstation:Basel
Datenherkunft:IDAweb
Stundenhäufigkeit
Lastprofil
Betriebspunkte
W1 0.254
W2 0.349
W3 0.262
W4 0.120
W5 0.015
Stundenhäufigkeit [h/Periode]
Kälteleistung [%]
Umgebungstemperatur TA [°C]

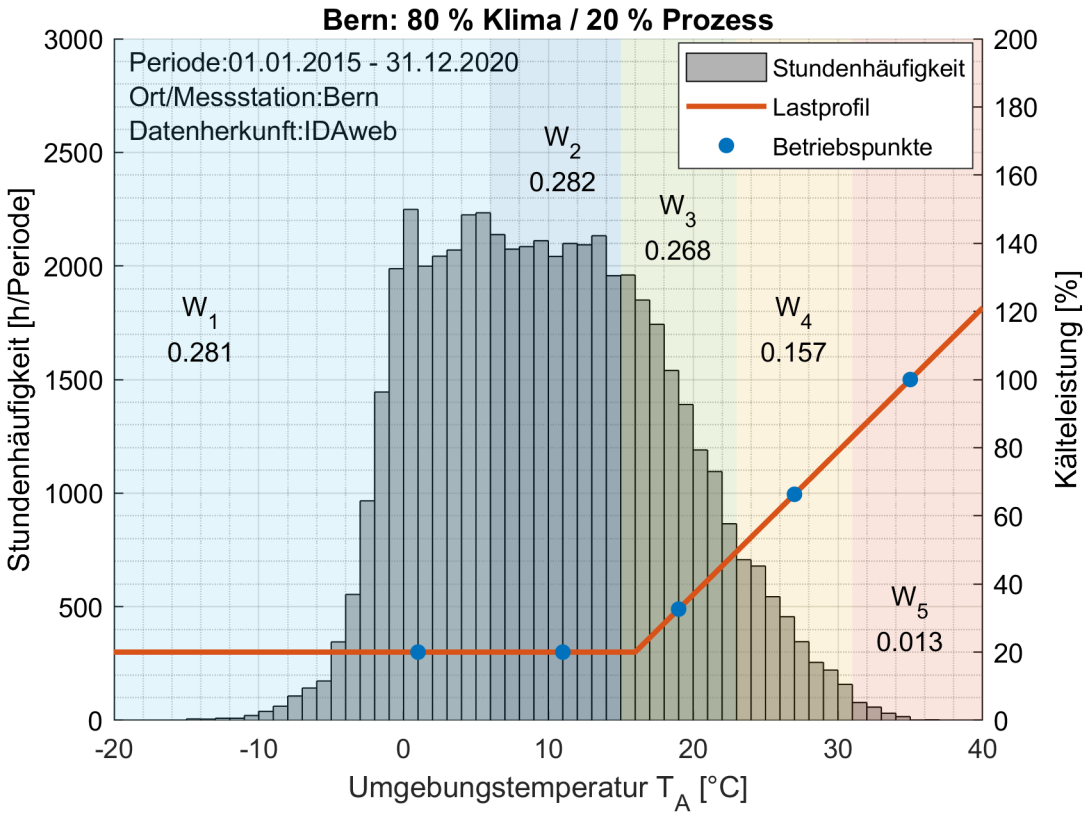

Basel: 80 % Klima / 20 % Prozess
Periode:01.01.2015 - 31.12.2020
Ort/Messstation:Basel
Datenherkunft:IDAweb
Stundenhäufigkeit
Lastprofil
Betriebspunkte
W1 0.204
W2 0.281
W3 0.288
W4 0.197
W5 0.029
Stundenhäufigkeit [h/Periode]
Kälteleistung [%]
Umgebungstemperatur TA [°C]

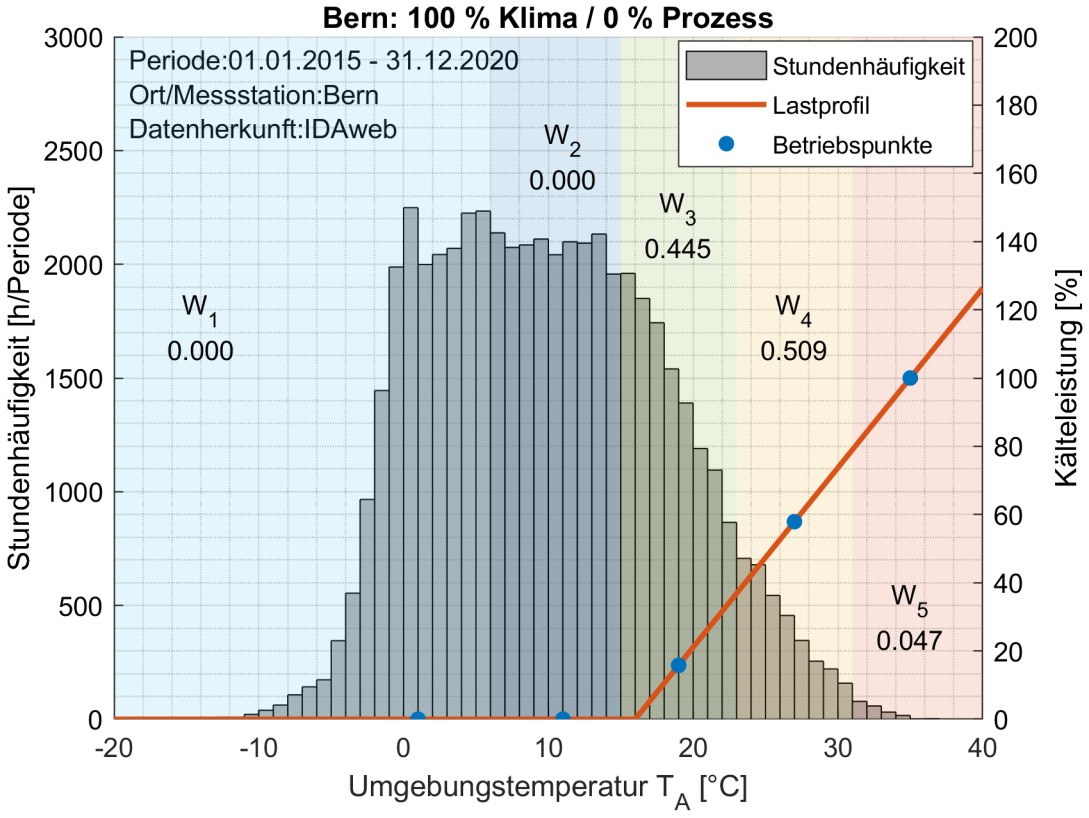

Basel: 100 % Klima / 0 % Prozess
Periode:01.01.2015 - 31.12.2020
Ort/Messstation:Basel
Datenherkunft:IDAweb
Stundenhäufigkeit
Lastprofil
Betriebspunkte
W1 0.000
W2 0.000
W3 0.396
W4 0.516
W5 0.088
Stundenhäufigkeit [h/Periode]
Kälteleistung [%]
Umgebungstemperatur TA [°C]

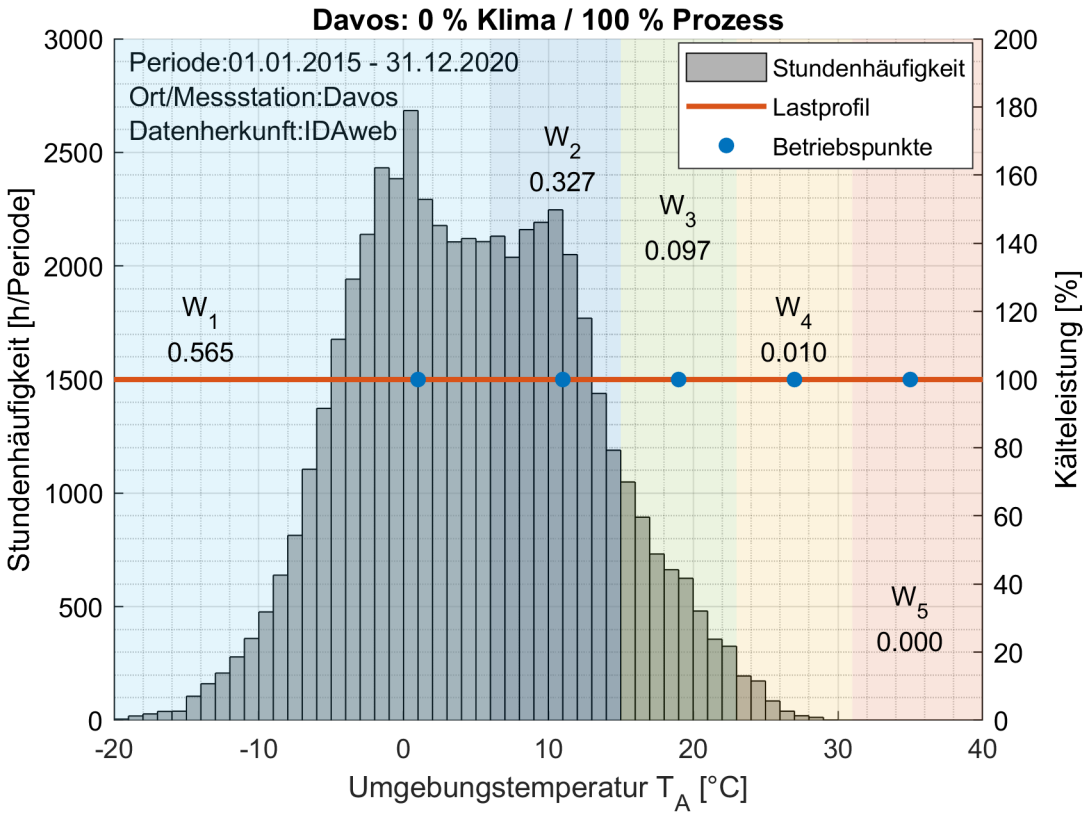

Bern: 0 % Klima / 100 % Prozess
Periode:01.01.2015 - 31.12.2020
Ort/Messstation:Bern
Datenherkunft:IDAweb
Stundenhäufigkeit
Lastprofil
Betriebspunkte
W1 0.355
W2 0.356
W3 0.221
W4 0.064
W5 0.004
Stundenhäufigkeit [h/Periode]
Kälteleistung [%]
Umgebungstemperatur TA [°C]

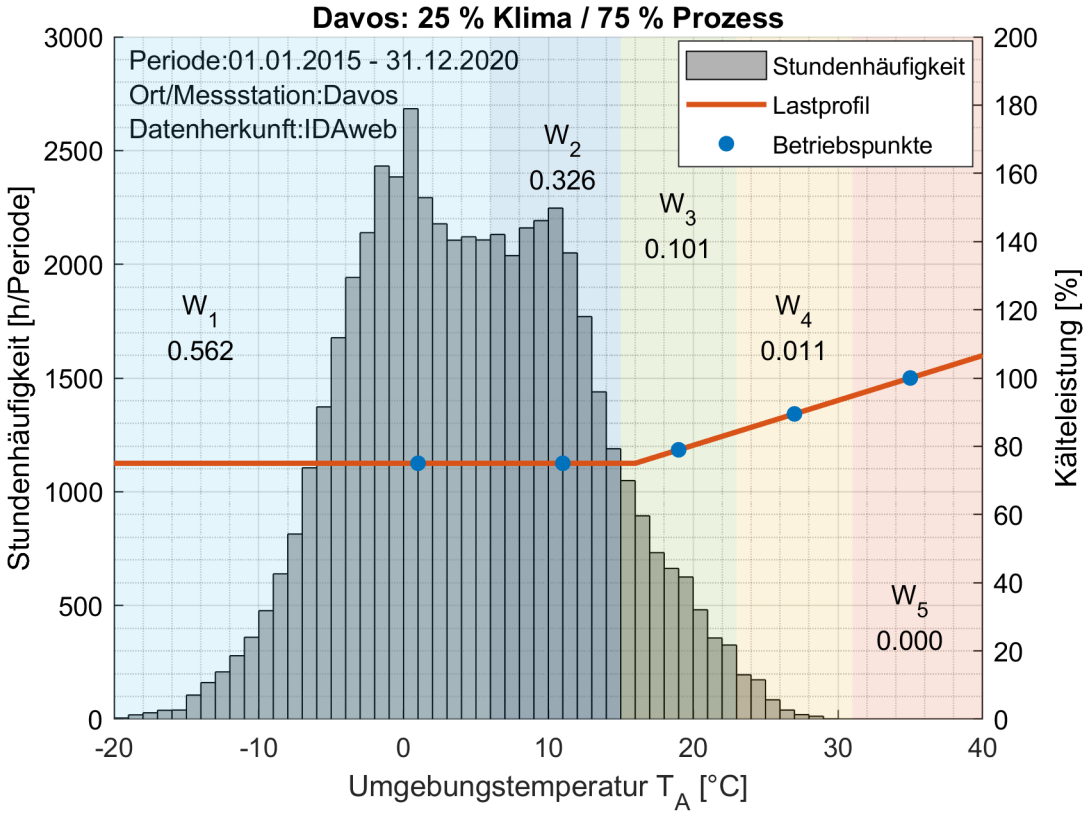

Bern: 25 % Klima / 75 % Prozess
Periode:01.01.2015 - 31.12.2020
Ort/Messstation:Bern
Datenherkunft:IDAweb
Stundenhäufigkeit
Lastprofil
Betriebspunkte
W1 0.348
W2 0.348
W3 0.226
W4 0.074
W5 0.004
Stundenhäufigkeit [h/Periode]
Kälteleistung [%]
Umgebungstemperatur TA [°C]

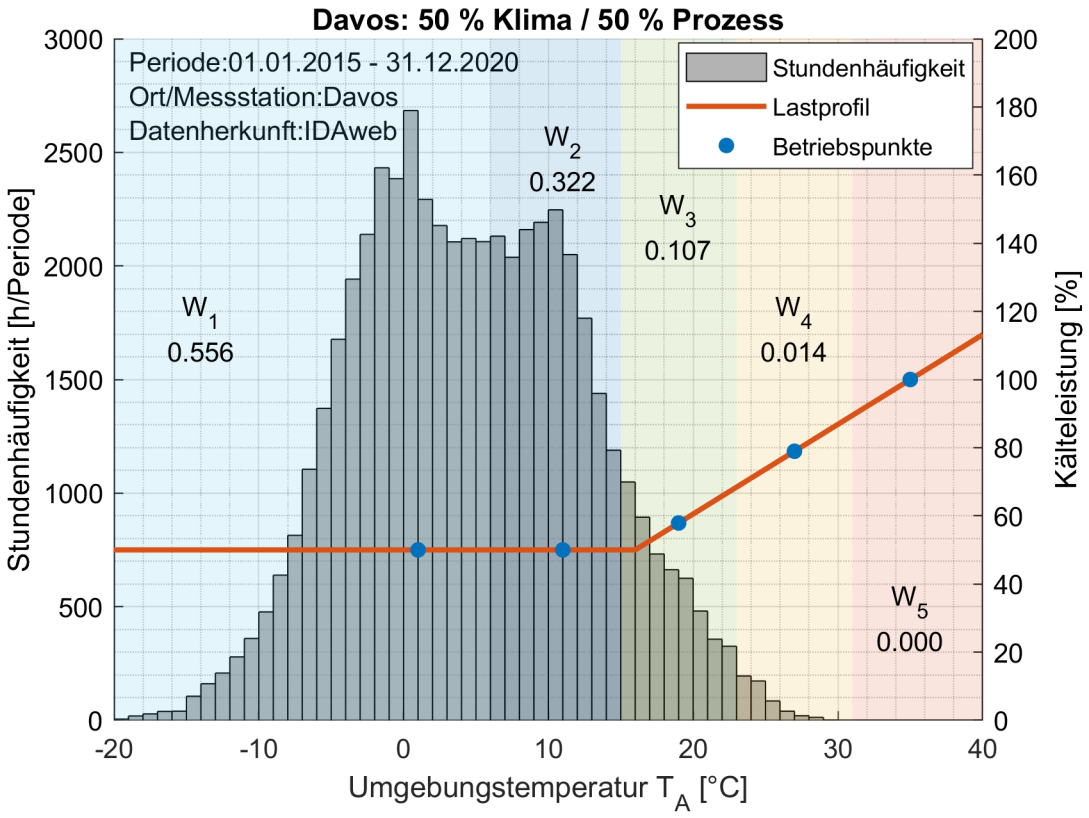

Bern: 50 % Klima / 50 % Prozess
Periode:01.01.2015 - 31.12.2020
Ort/Messstation:Bern
Datenherkunft:IDAweb
Stundenhäufigkeit
Lastprofil
Betriebspunkte
W1 0.333
W2 0.334
W3 0.235
W4 0.091
W5 0.006
Stundenhäufigkeit [h/Periode]
Kälteleistung [%]
Umgebungstemperatur TA [°C]

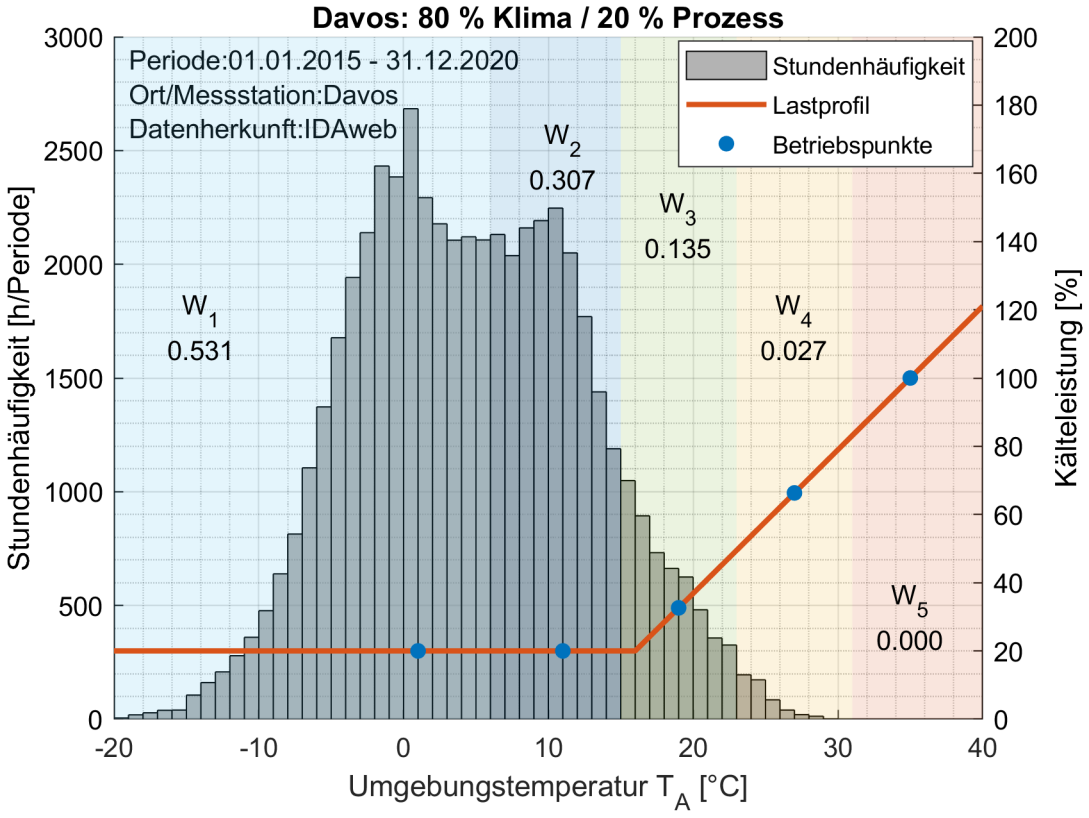

Bern: 80 % Klima / 20 % Prozess
Periode:01.01.2015 - 31.12.2020
Ort/Messstation:Bern
Datenherkunft:IDAweb
Stundenhäufigkeit
Lastprofil
Betriebspunkte
W1 0.281
W2 0.282
W3 0.268
W4 0.157
W5 0.013
Stundenhäufigkeit [h/Periode]
Kälteleistung [%]
Umgebungstemperatur TA [°C]

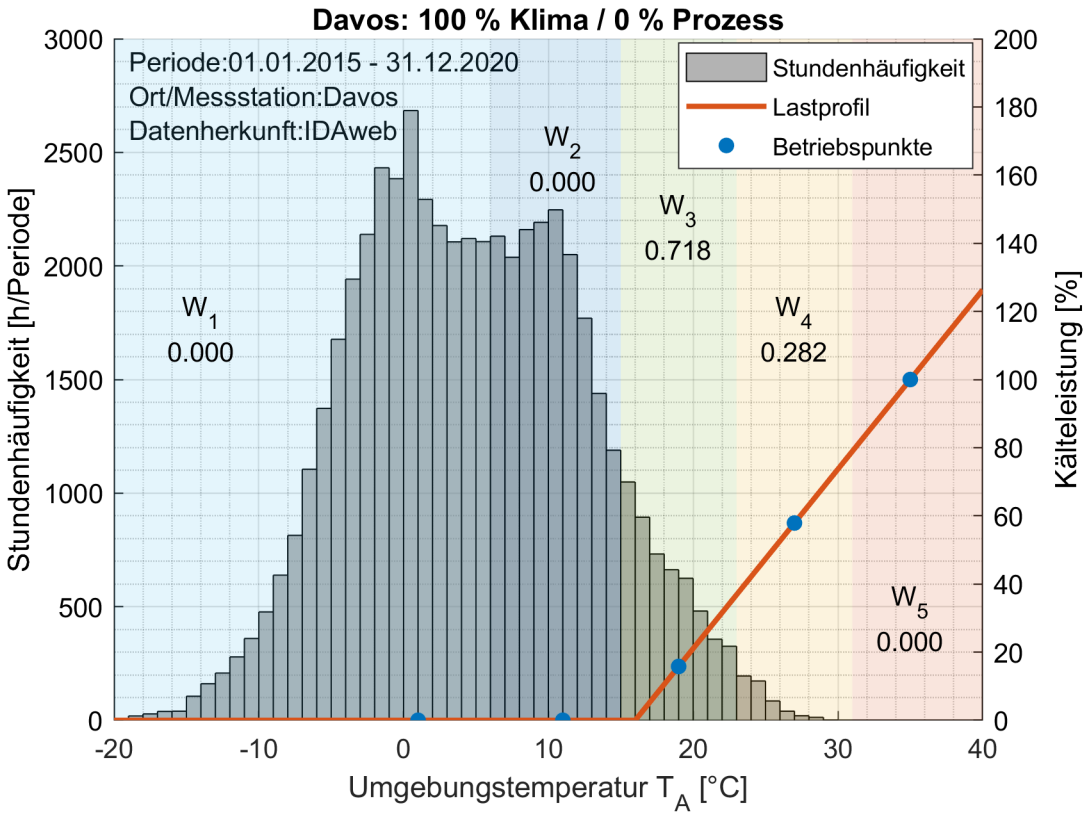

Bern: 100 % Klima / 0 % Prozess
Periode:01.01.2015 - 31.12.2020
Ort/Messstation:Bern
Datenherkunft:IDAweb
Stundenhäufigkeit
Lastprofil
Betriebspunkte
W1 0.000
W2 0.000
W3 0.445
W4 0.509
W5 0.047
Stundenhäufigkeit [h/Periode]
Kälteleistung [%]
Umgebungstemperatur TA [°C]

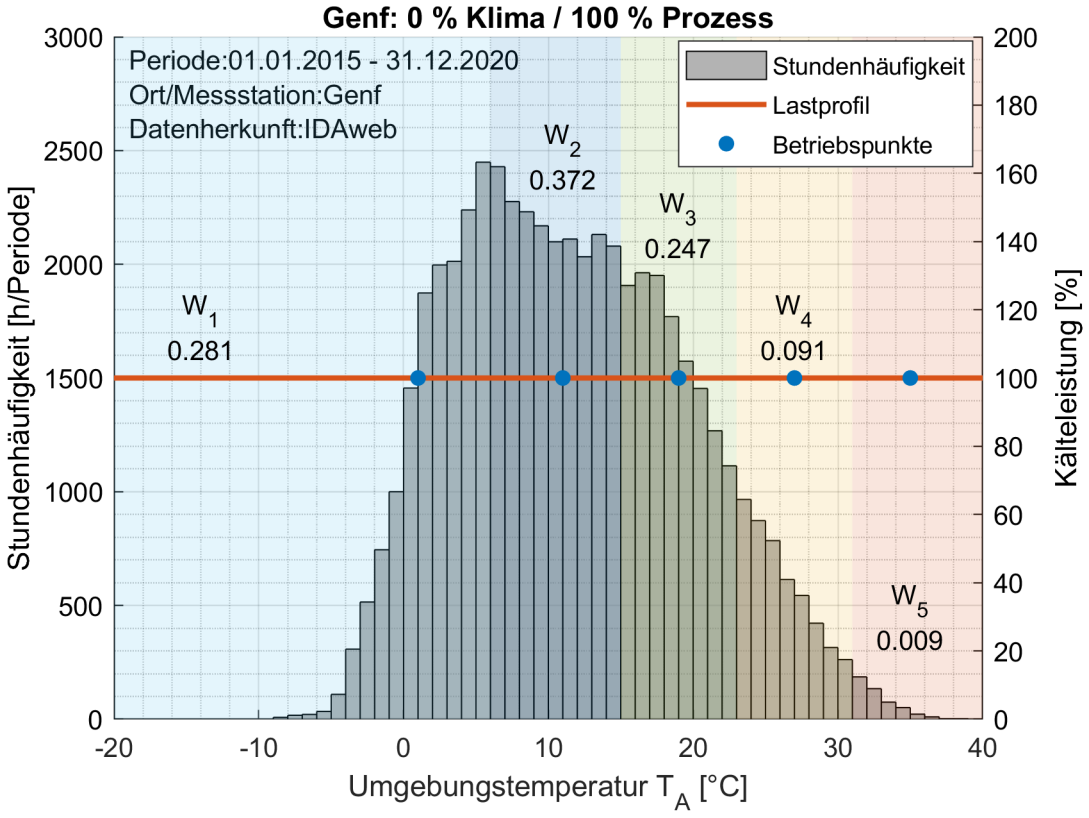

Davos: 0 % Klima / 100 % Prozess
Periode:01.01.2015 - 31.12.2020
Ort/Messstation:Davos
Datenherkunft:IDAweb
Stundenhäufigkeit
Lastprofil
Betriebspunkte
W1 0.565
W2 0.327
W3 0.097
W4 0.010
W5 0.000
Stundenhäufigkeit [h/Periode]
Kälteleistung [%]
Umgebungstemperatur TA [°C]

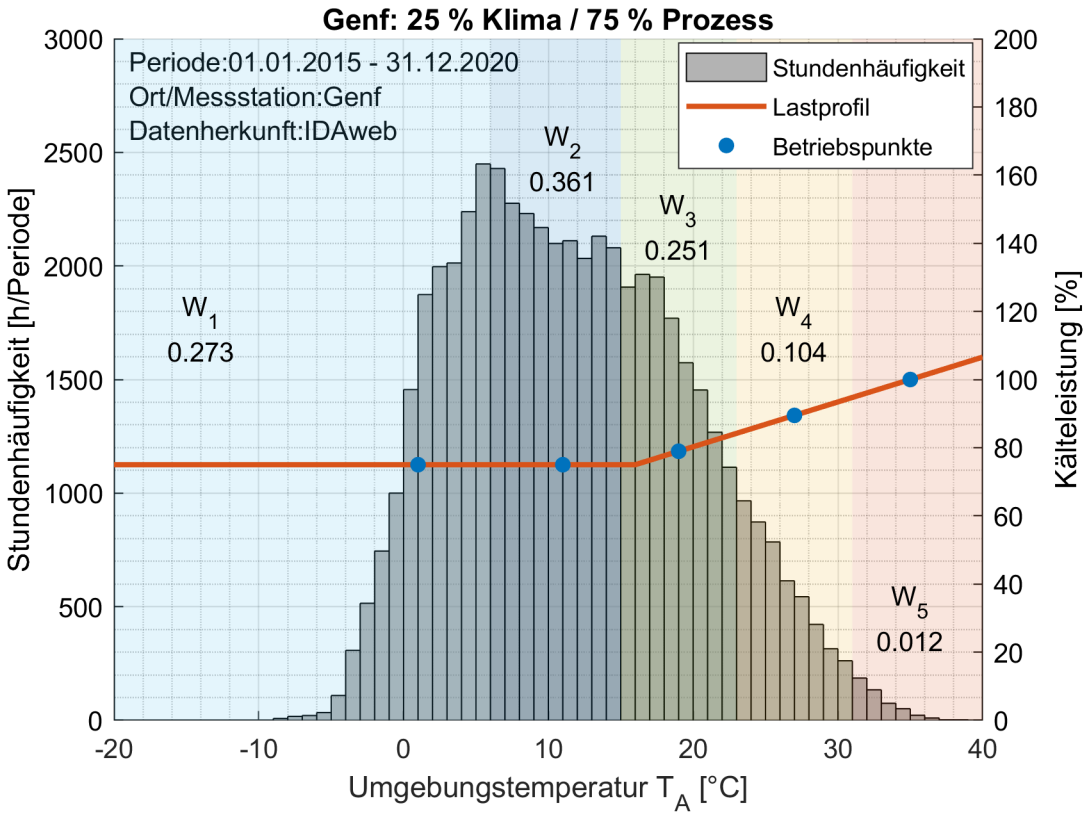

Davos: 25 % Klima / 75 % Prozess
Periode:01.01.2015 - 31.12.2020
Ort/Messstation:Davos
Datenherkunft:IDAweb
Stundenhäufigkeit
Lastprofil
Betriebspunkte
W1 0.562
W2 0.326
W3 0.101
W4 0.011
W5 0.000
Stundenhäufigkeit [h/Periode]
Kälteleistung [%]
Umgebungstemperatur TA [°C]

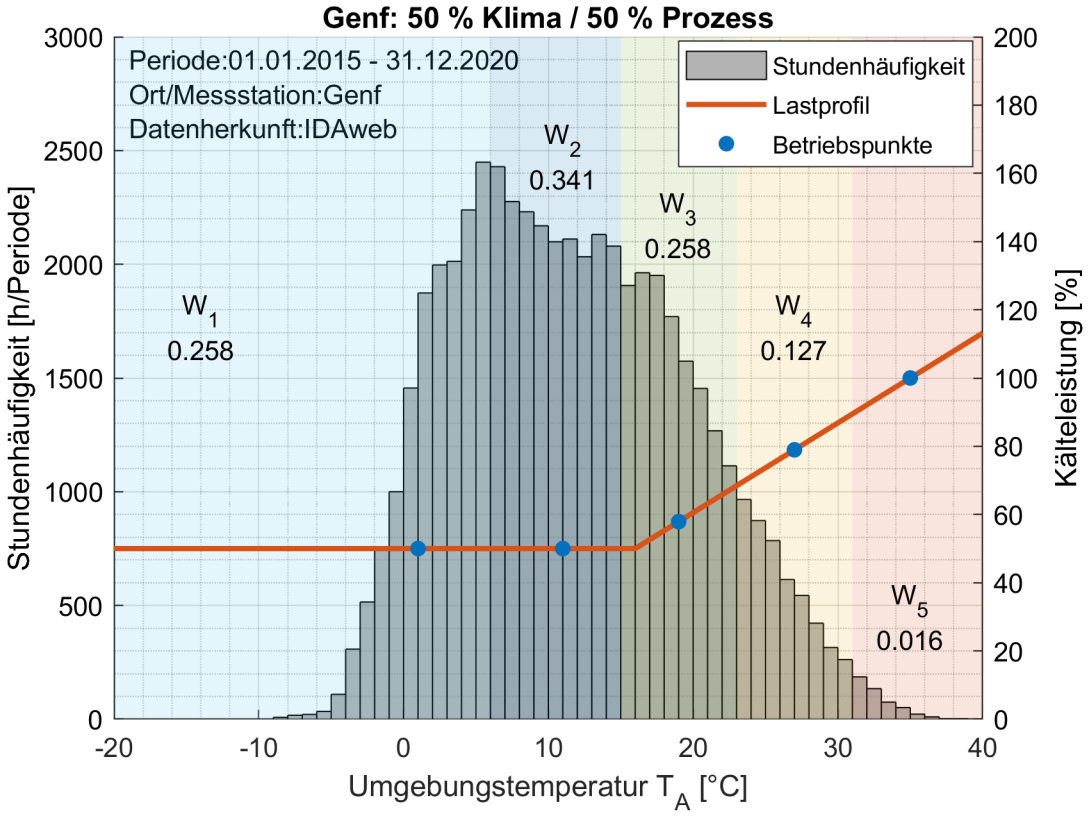

Davos: 50 % Klima / 50 % Prozess
Periode:01.01.2015 - 31.12.2020
Ort/Messstation:Davos
Datenherkunft:IDAweb
Stundenhäufigkeit
Lastprofil
Betriebspunkte
W1 0.556
W2 0.322
W3 0.107
W4 0.014
W5 0.000
Stundenhäufigkeit [h/Periode]
Kälteleistung [%]
Umgebungstemperatur TA [°C]

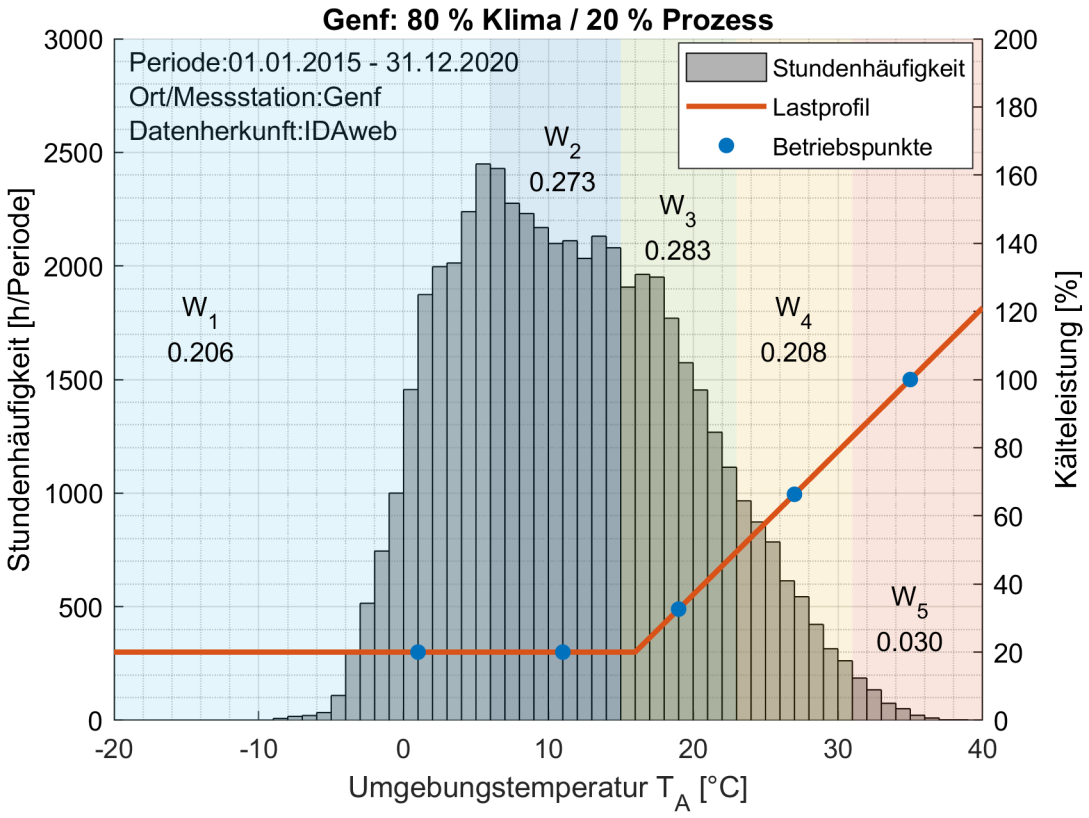

Davos: 80 % Klima / 20 % Prozess
Periode:01.01.2015 - 31.12.2020
Ort/Messstation:Davos
Datenherkunft:IDAweb
Stundenhäufigkeit
Lastprofil
Betriebspunkte
W1 0.531
W2 0.307
W3 0.135
W4 0.027
W5 0.000
Stundenhäufigkeit [h/Periode]
Kälteleistung [%]
Umgebungstemperatur TA [°C]

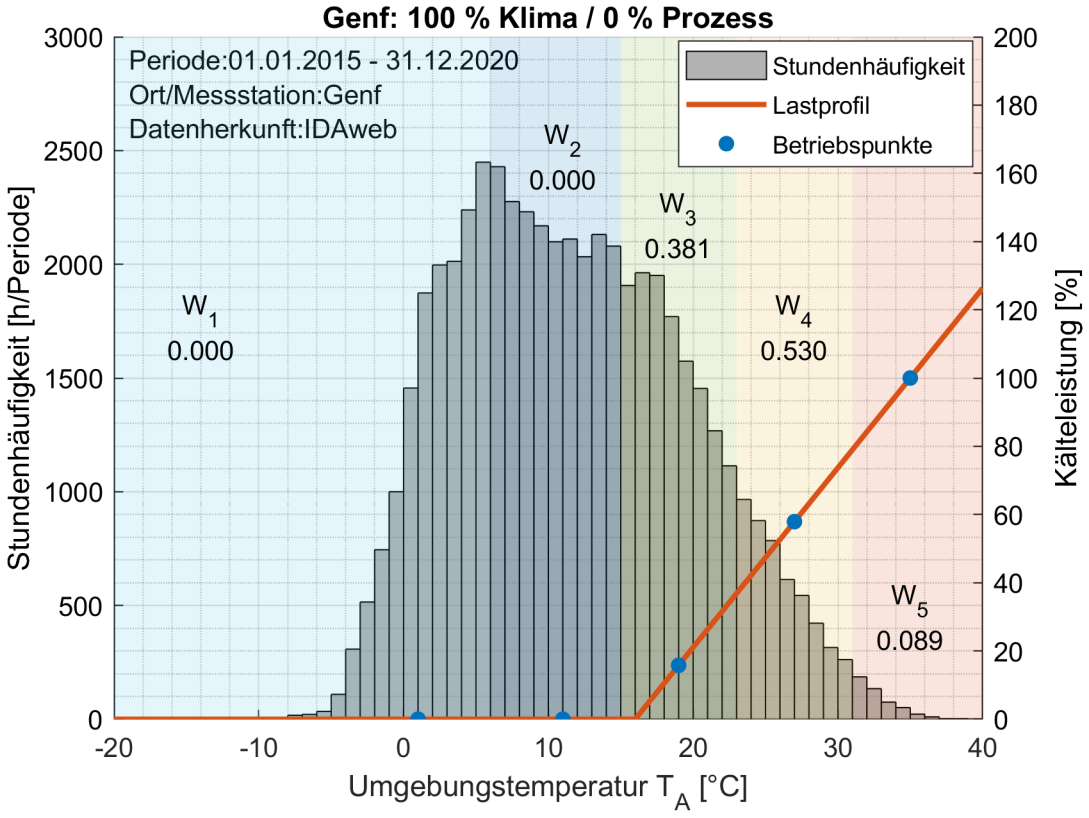

Davos: 100 % Klima / 0 % Prozess
Periode:01.01.2015 - 31.12.2020
Ort/Messstation:Davos
Datenherkunft:IDAweb
Stundenhäufigkeit
Lastprofil
Betriebspunkte
W1 0.000
W2 0.000
W3 0.718
W4 0.282
W5 0.000
Stundenhäufigkeit [h/Periode]
Kälteleistung [%]
Umgebungstemperatur TA [°C]

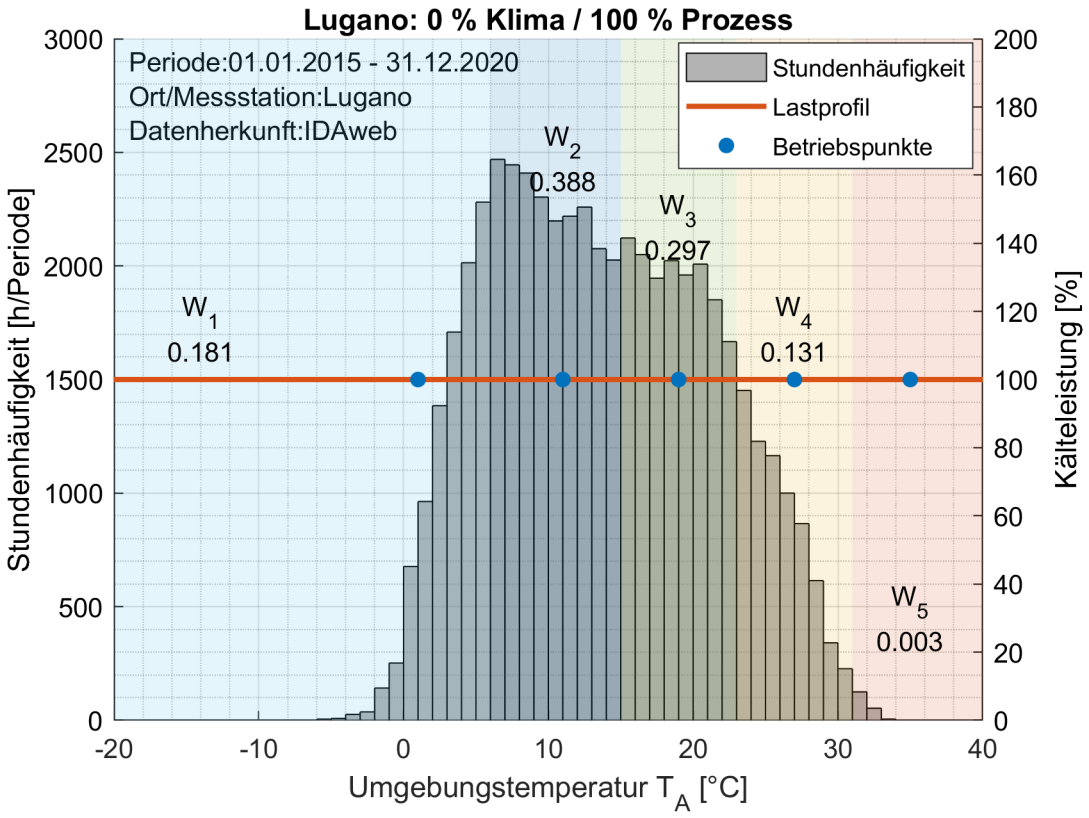

Genf: 0 % Klima / 100 % Prozess
Periode:01.01.2015 - 31.12.2020
Ort/Messstation:Genf
Datenherkunft:IDAweb
Stundenhäufigkeit
Lastprofil
Betriebspunkte
W1 0.281
W2 0.372
W3 0.247
W4 0.091
W5 0.009
Stundenhäufigkeit [h/Periode]
Kälteleistung [%]
Umgebungstemperatur TA [°C]

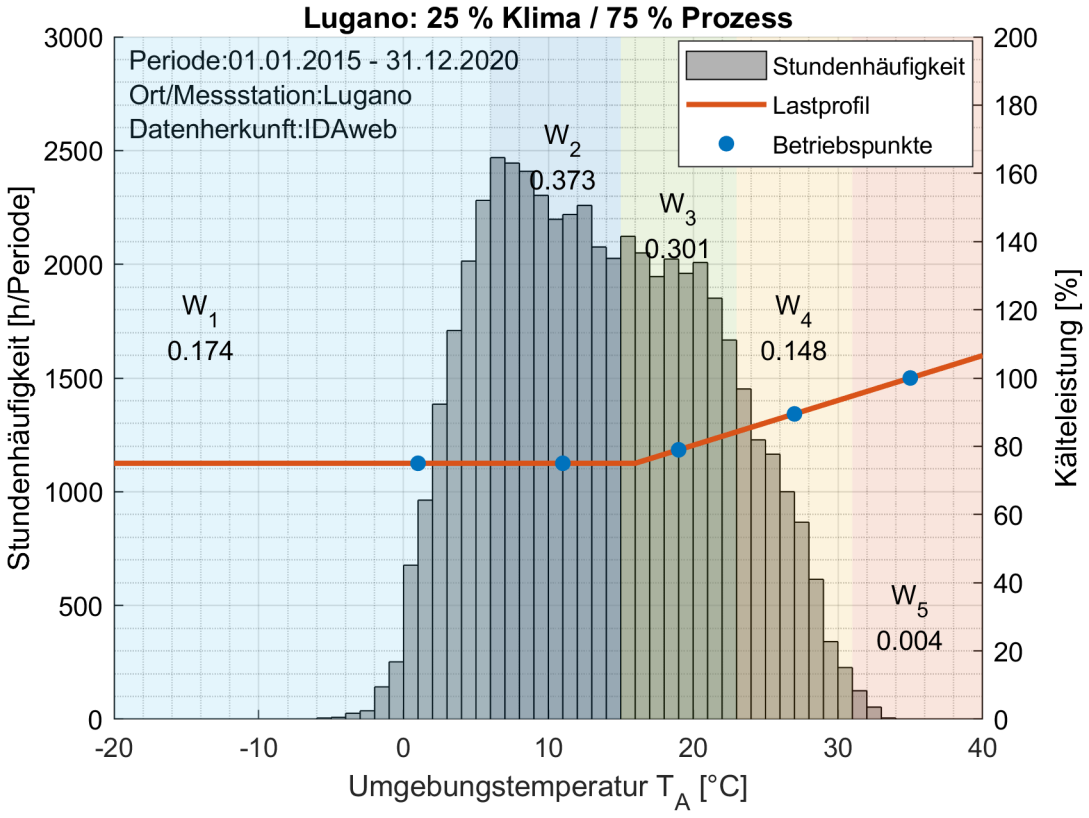

Genf: 25 % Klima / 75 % Prozess
Periode:01.01.2015 - 31.12.2020
Ort/Messstation:Genf
Datenherkunft:IDAweb
Stundenhäufigkeit
Lastprofil
Betriebspunkte
W1 0.273
W2 0.361
W3 0.251
W4 0.104
W5 0.012
Stundenhäufigkeit [h/Periode]
Kälteleistung [%]
Umgebungstemperatur TA [°C]

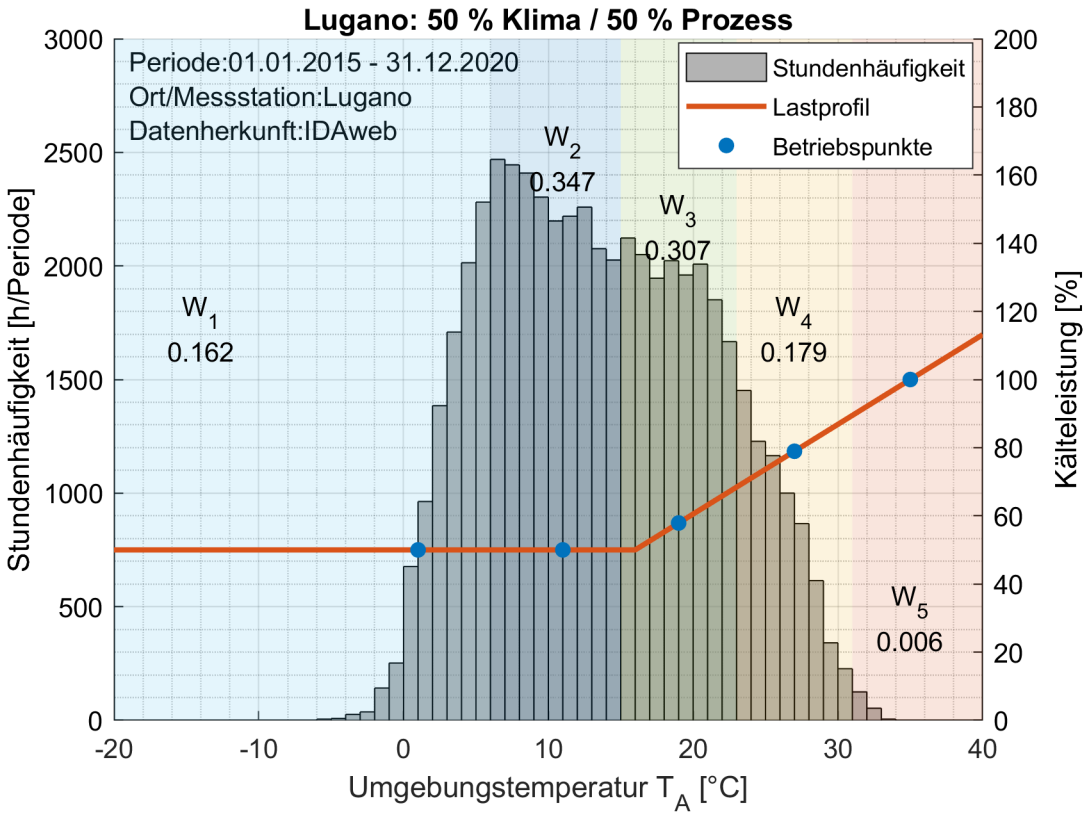

Genf: 50 % Klima / 50 % Prozess
Periode:01.01.2015 - 31.12.2020
Ort/Messstation:Genf
Datenherkunft:IDAweb
Stundenhäufigkeit
Lastprofil
Betriebspunkte
W1 0.258
W2 0.341
W3 0.258
W4 0.127
W5 0.016
Stundenhäufigkeit [h/Periode]
Kälteleistung [%]
Umgebungstemperatur TA [°C]

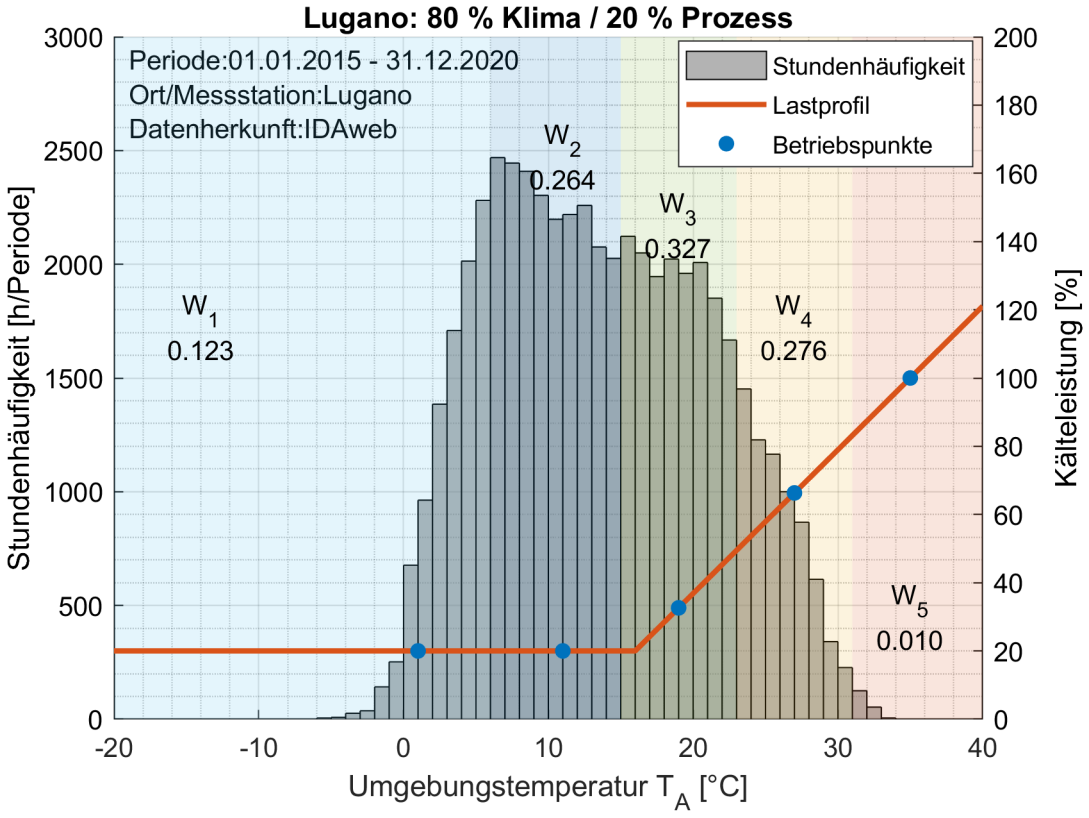

Genf: 80 % Klima / 20 % Prozess
Periode:01.01.2015 - 31.12.2020
Ort/Messstation:Genf
Datenherkunft:IDAweb
Stundenhäufigkeit
Lastprofil
Betriebspunkte
W1 0.206
W2 0.273
W3 0.283
W4 0.208
W5 0.030
Stundenhäufigkeit [h/Periode]
Kälteleistung [%]
Umgebungstemperatur TA [°C]

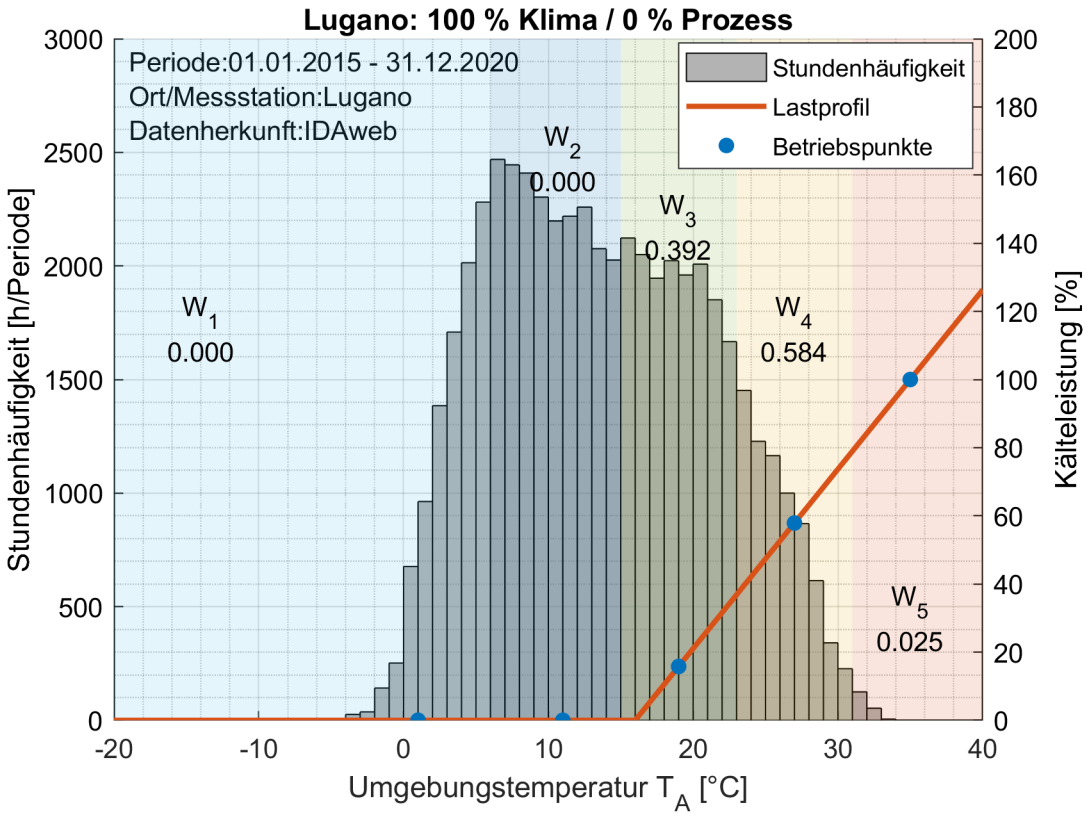

Genf: 100 % Klima / 0 % Prozess
Periode:01.01.2015 - 31.12.2020
Ort/Messstation:Genf
Datenherkunft:IDAweb
Stundenhäufigkeit
Lastprofil
Betriebspunkte
W1 0.000
W2 0.000
W3 0.381
W4 0.530
W5 0.089
Stundenhäufigkeit [h/Periode]
Kälteleistung [%]
Umgebungstemperatur TA [°C]

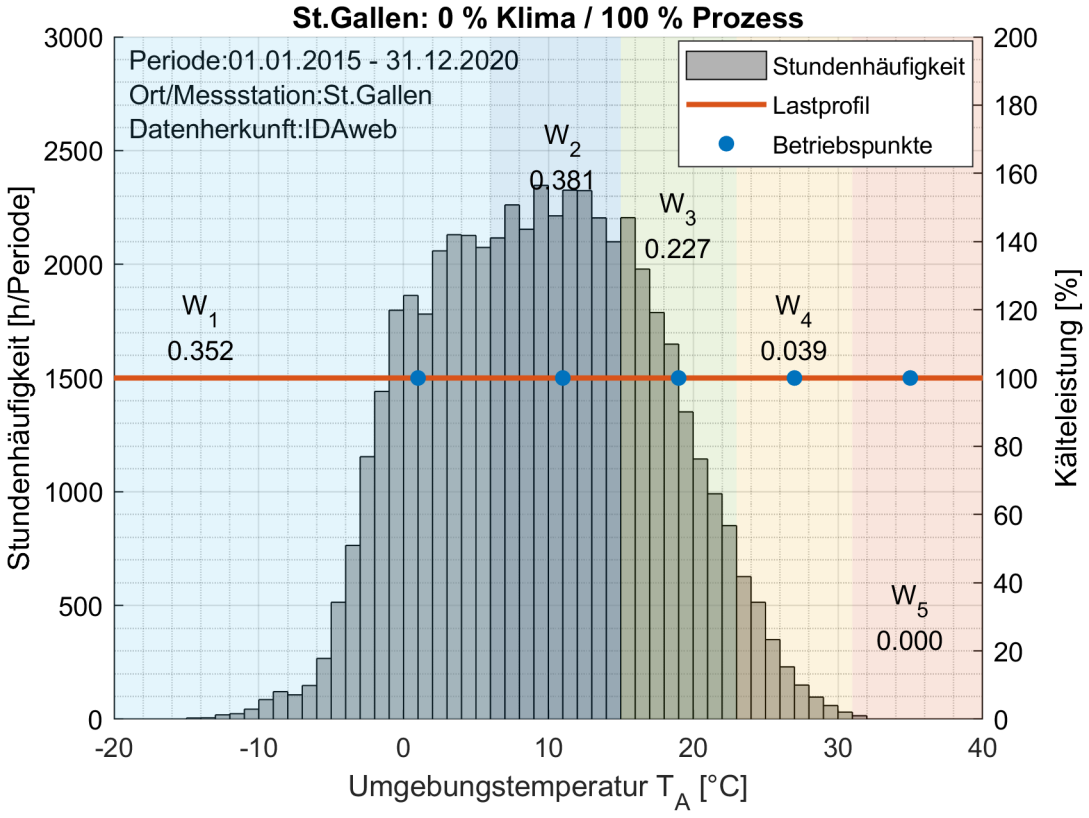

Lugano: 0 % Klima / 100 % Prozess
Periode:01.01.2015 - 31.12.2020
Ort/Messstation:Lugano
Datenherkunft:IDAweb
Stundenhäufigkeit
Lastprofil
Betriebspunkte
W1
0.181
W2
0.388
W3
0.297
W4
0.131
W5
0.003
Stundenhäufigkeit [h/Periode]
Kälteleistung [%]
Umgebungstemperatur TA [°C]

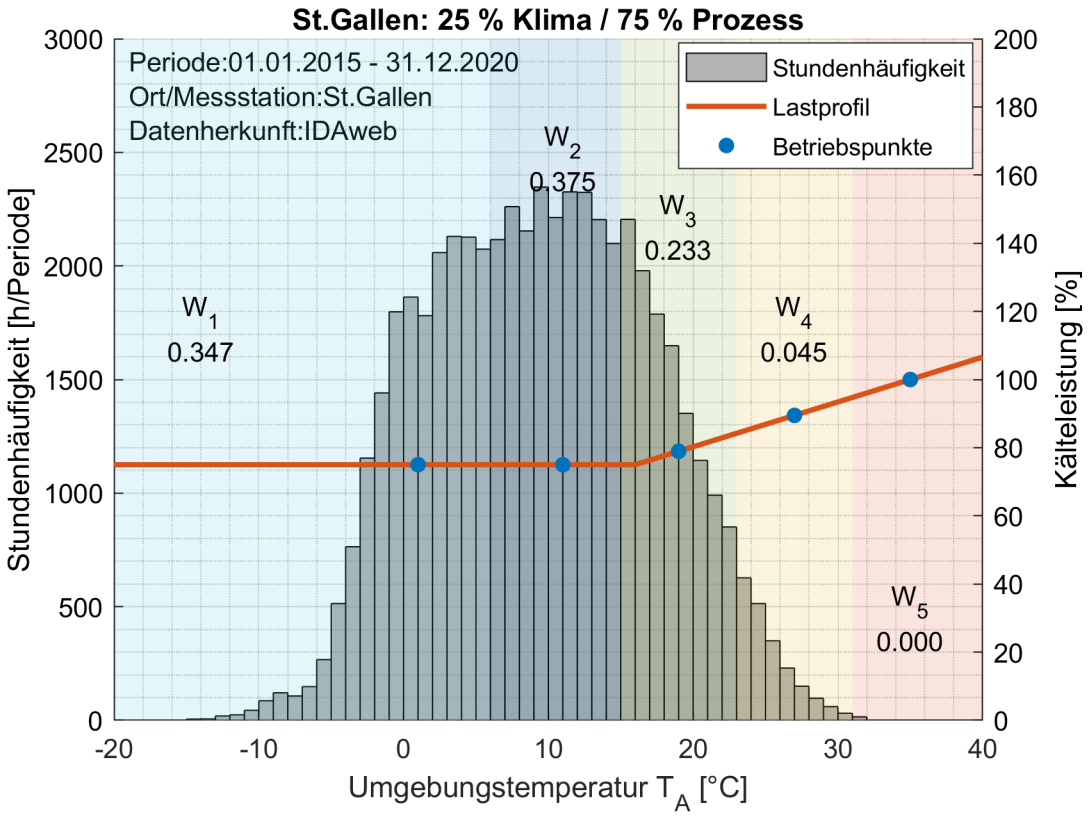

Lugano: 25 % Klima / 75 % Prozess
Periode:01.01.2015 - 31.12.2020
Ort/Messstation:Lugano
Datenherkunft:IDAweb
Stundenhäufigkeit
Lastprofil
Betriebspunkte
W1
0.174
W2
0.373
W3
0.301
W4
0.148
W5
0.004
Stundenhäufigkeit [h/Periode]
Kälteleistung [%]
Umgebungstemperatur TA [°C]

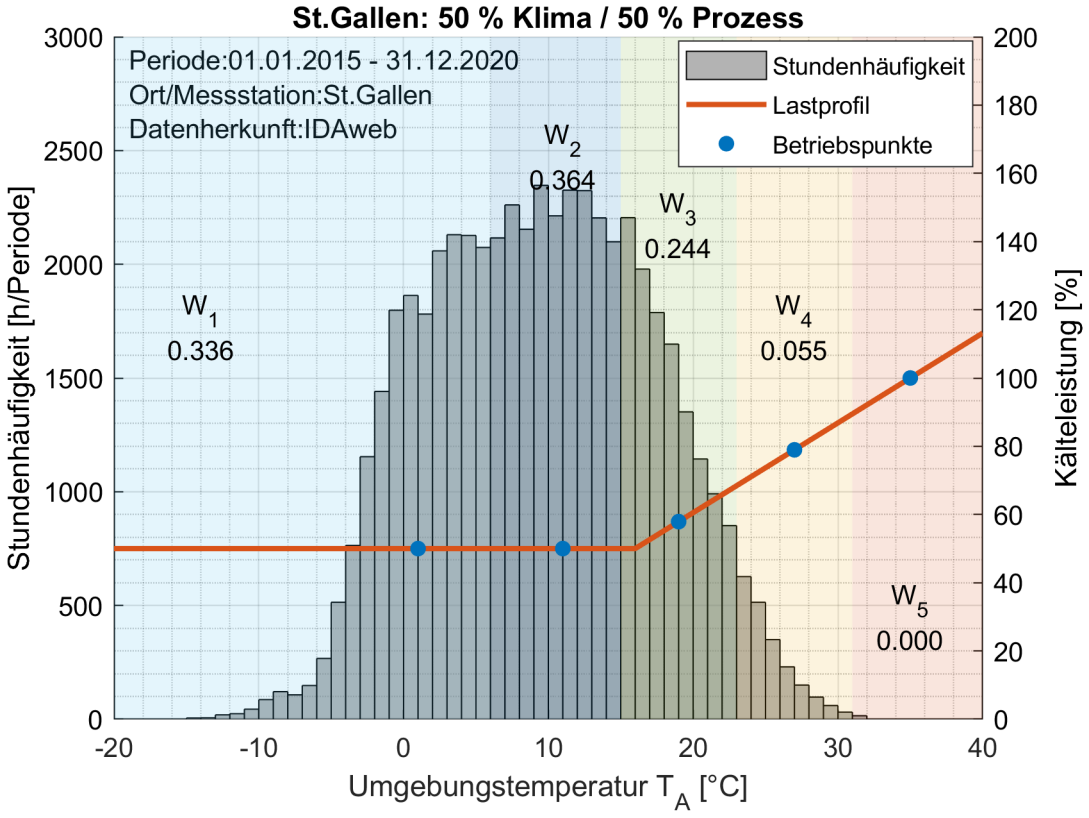

Lugano: 50 % Klima / 50 % Prozess
Periode:01.01.2015 - 31.12.2020
Ort/Messstation:Lugano
Datenherkunft:IDAweb
Stundenhäufigkeit
Lastprofil
Betriebspunkte
W1
0.162
W2
0.347
W3
0.307
W4
0.179
W5
0.006
Stundenhäufigkeit [h/Periode]
Kälteleistung [%]
Umgebungstemperatur TA [°C]

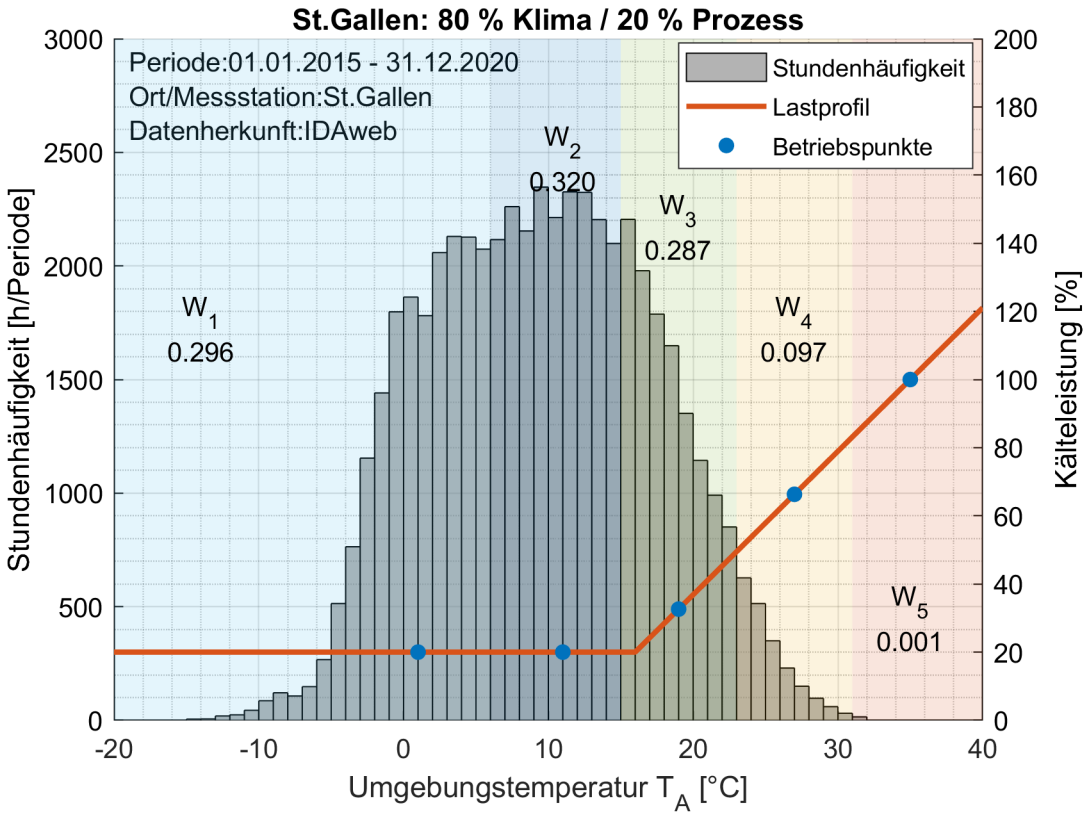

Lugano: 80 % Klima / 20 % Prozess
Periode:01.01.2015 - 31.12.2020
Ort/Messstation:Lugano
Datenherkunft:IDAweb
Stundenhäufigkeit
Lastprofil
Betriebspunkte
W1
0.123
W2
0.264
W3
0.327
W4
0.276
W5
0.010
Stundenhäufigkeit [h/Periode]
Kälteleistung [%]
Umgebungstemperatur TA [°C]

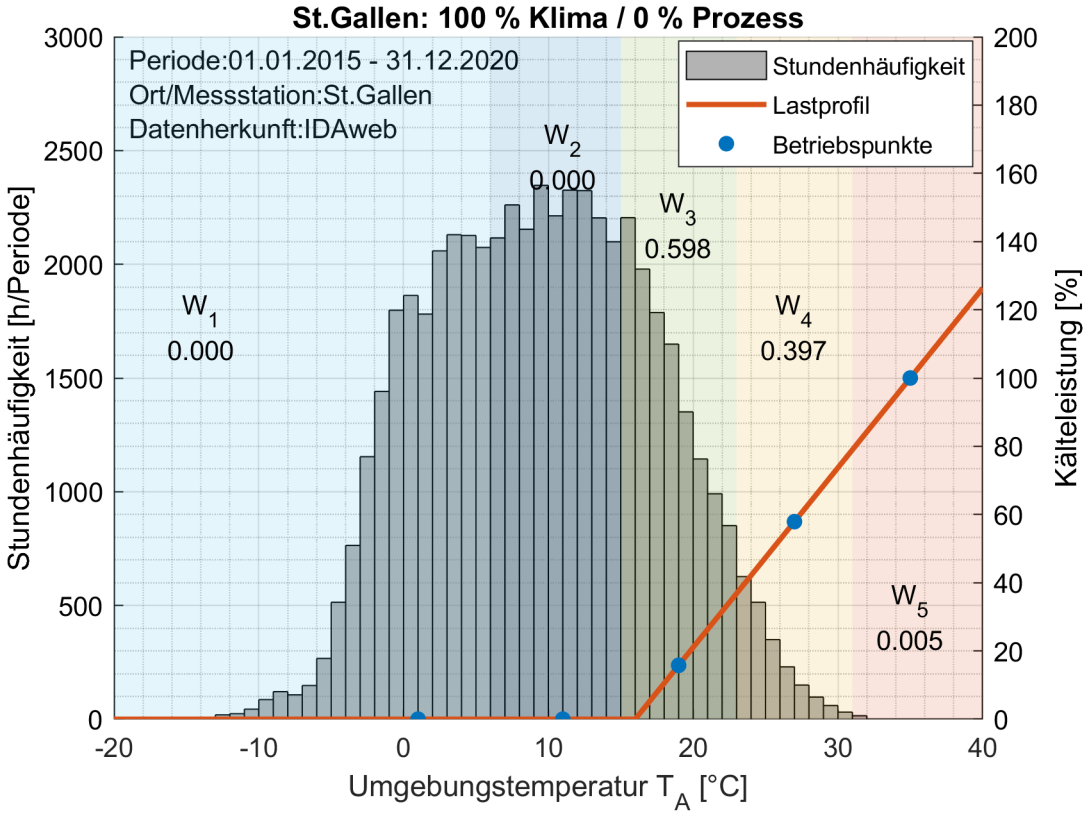

Lugano: 100 % Klima / 0 % Prozess
Periode:01.01.2015 - 31.12.2020
Ort/Messstation:Lugano
Datenherkunft:IDAweb
Stundenhäufigkeit
Lastprofil
Betriebspunkte
W1 0.000
W2 0.000
W3 0.392
W4 0.584
W5 0.025
Stundenhäufigkeit [h/Periode]
Kälteleistung [%]
Umgebungstemperatur TA [°C]

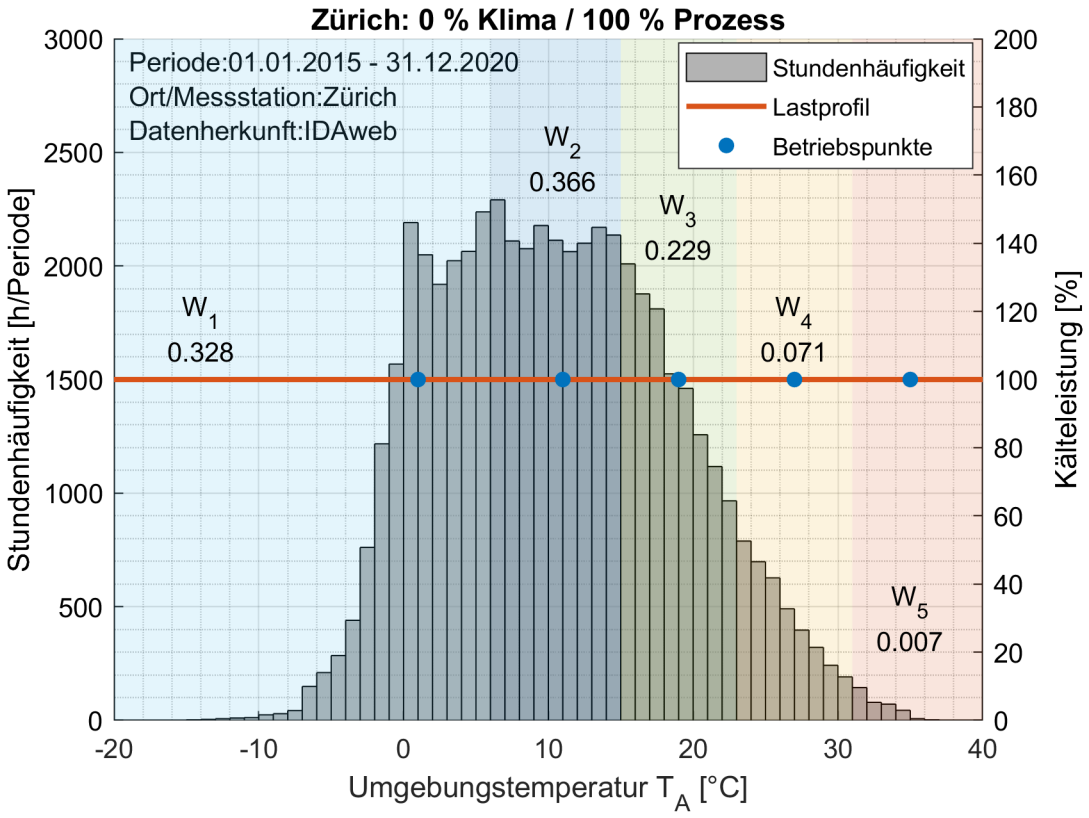

St.Gallen: 0 % Klima / 100 % Prozess
Periode:01.01.2015 - 31.12.2020
Ort/Messstation:St.Gallen
Datenherkunft:IDAweb
Stundenhäufigkeit
Lastprofil
Betriebspunkte
W1 0.352
W2 0.381
W3 0.227
W4 0.039
W5 0.000
Stundenhäufigkeit [h/Periode]
Kälteleistung [%]
Umgebungstemperatur TA [°C]

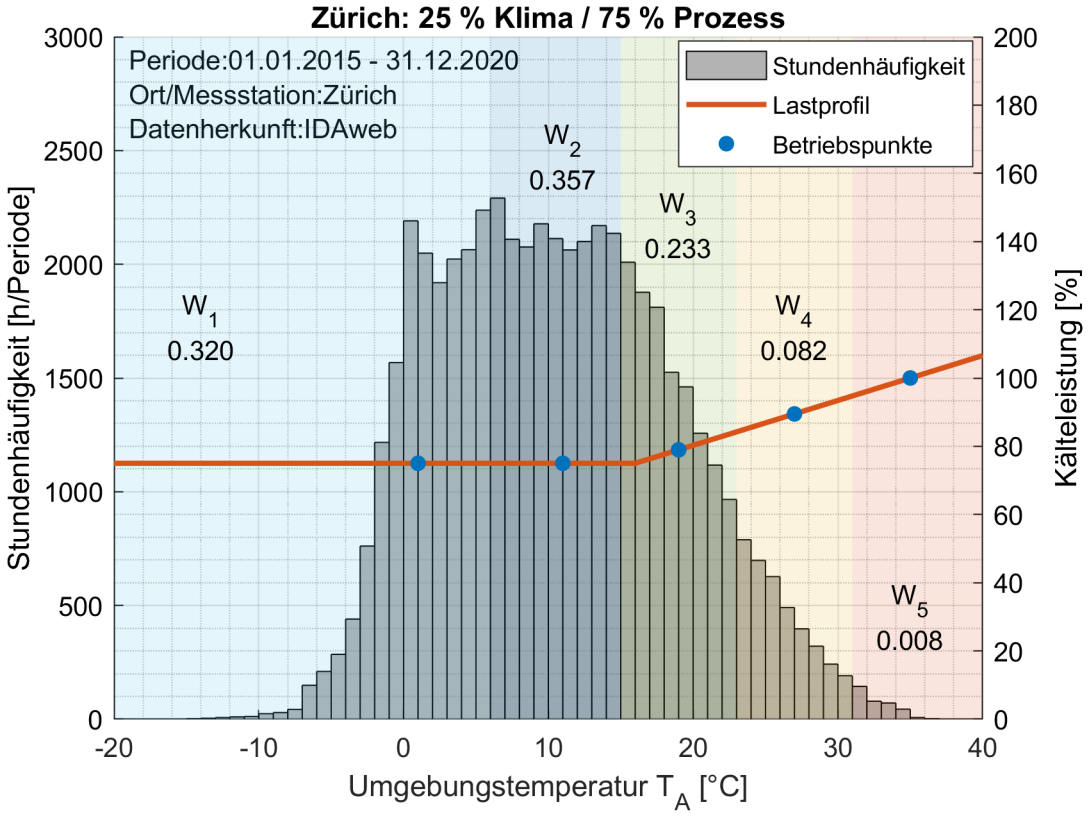

St.Gallen: 25 % Klima / 75 % Prozess
Periode:01.01.2015 - 31.12.2020
Ort/Messstation:St.Gallen
Datenherkunft:IDAweb
Stundenhäufigkeit
Lastprofil
Betriebspunkte
W1 0.347
W2 0.375
W3 0.233
W4 0.045
W5 0.000
Stundenhäufigkeit [h/Periode]
Kälteleistung [%]
Umgebungstemperatur TA [°C]

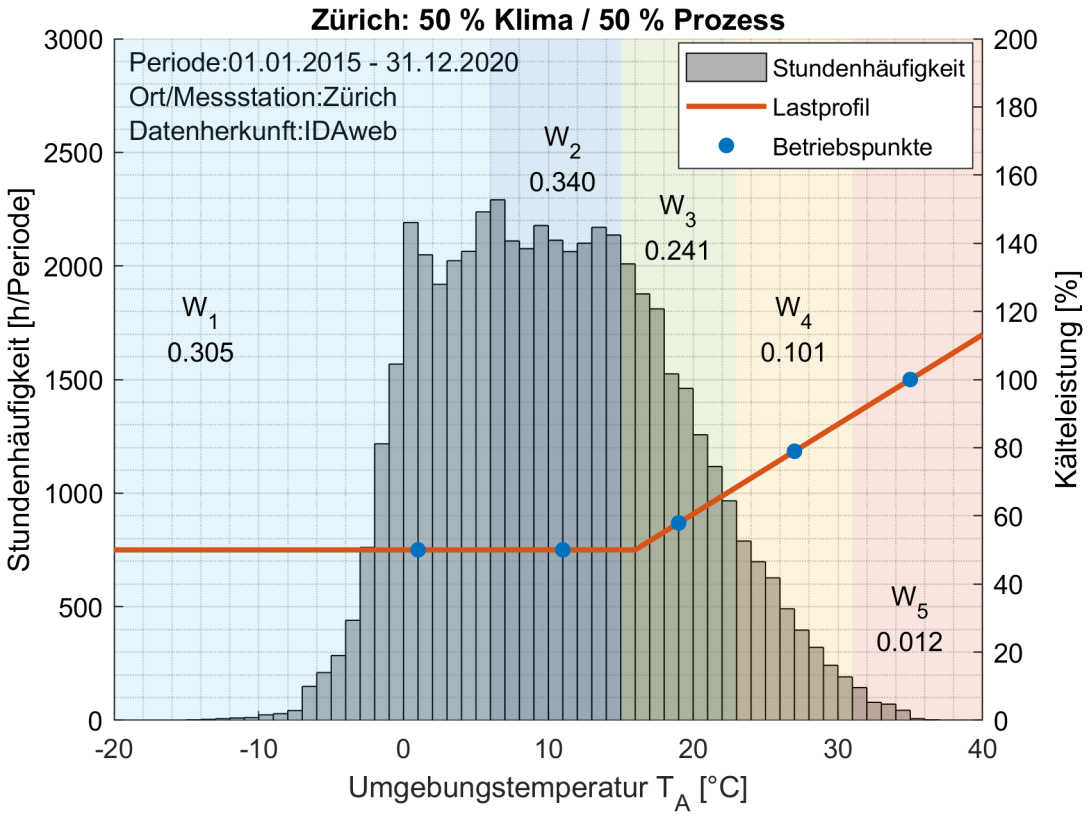

St.Gallen: 50 % Klima / 50 % Prozess
Periode:01.01.2015 - 31.12.2020
Ort/Messstation:St.Gallen
Datenherkunft:IDAweb
Stundenhäufigkeit
Lastprofil
Betriebspunkte
W1 0.336
W2 0.364
W3 0.244
W4 0.055
W5 0.000
Stundenhäufigkeit [h/Periode]
Kälteleistung [%]
Umgebungstemperatur TA [°C]

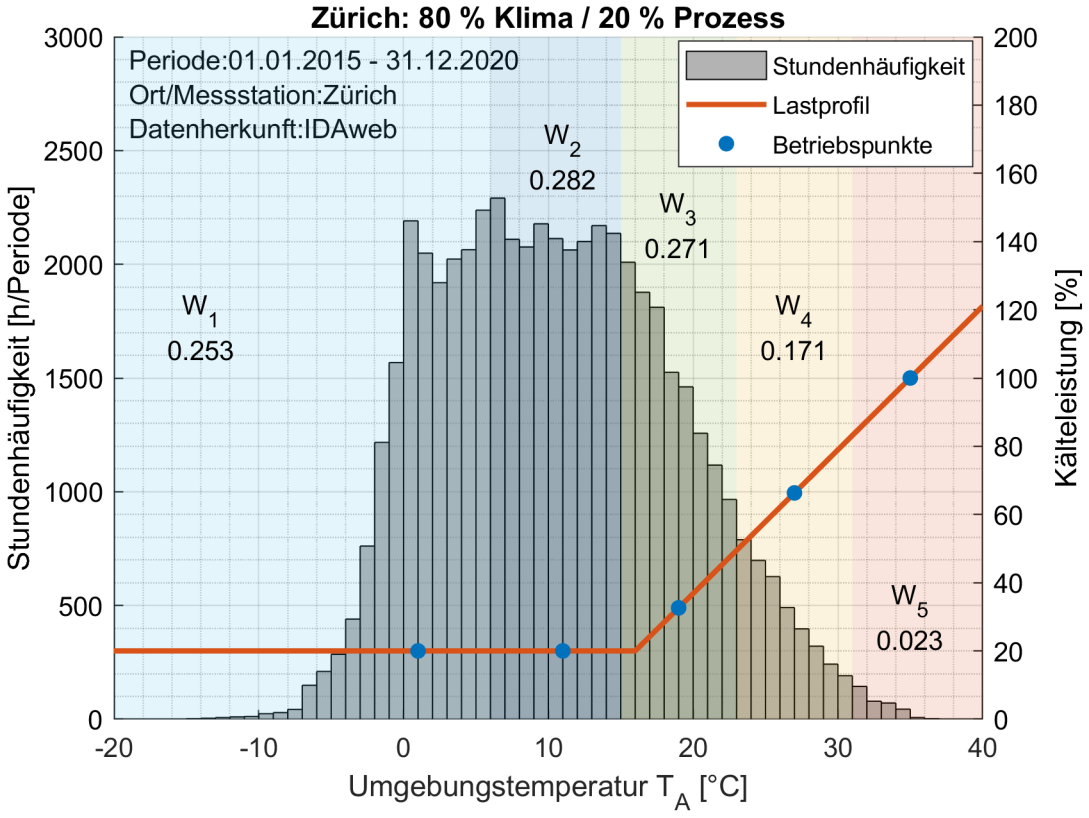

St.Gallen: 80 % Klima / 20 % Prozess
Periode:01.01.2015 - 31.12.2020
Ort/Messstation:St.Gallen
Datenherkunft:IDAweb
Stundenhäufigkeit
Lastprofil
Betriebspunkte
W1 0.296
W2 0.320
W3 0.287
W4 0.097
W5 0.001
Stundenhäufigkeit [h/Periode]
Kälteleistung [%]
Umgebungstemperatur TA [°C]

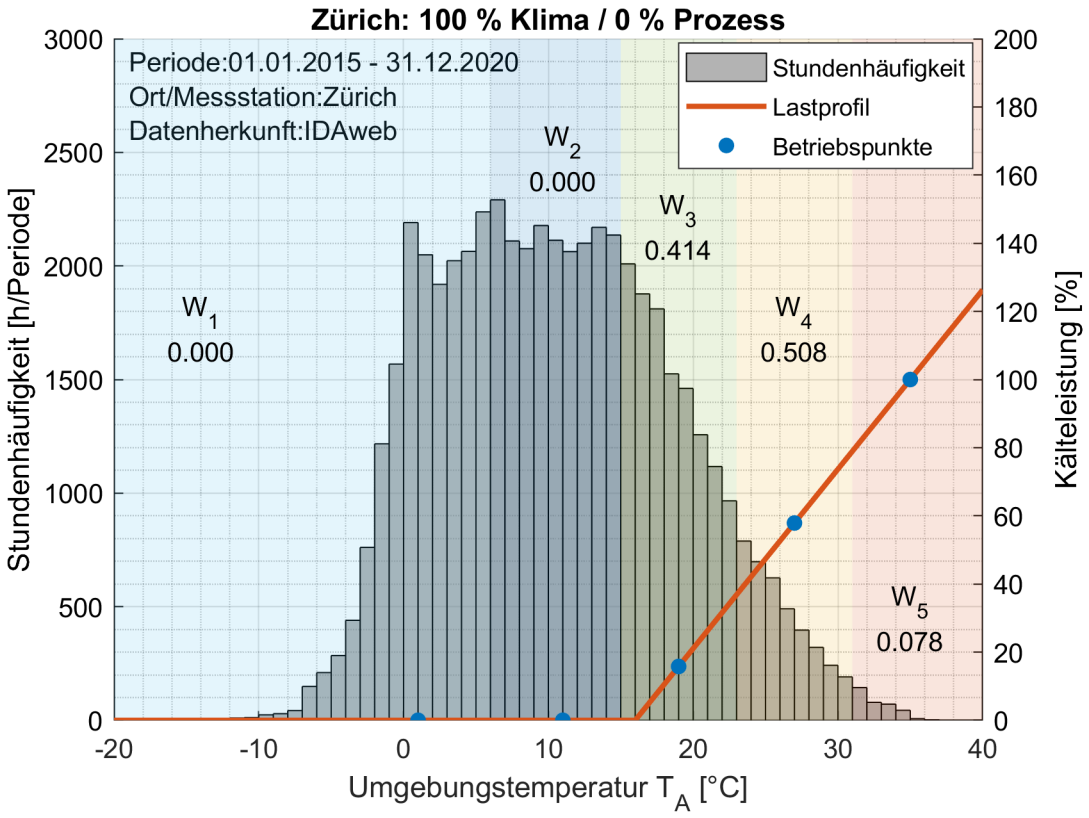

St.Gallen: 100 % Klima / 0 % Prozess
Periode:01.01.2015 - 31.12.2020
Ort/Messstation:St.Gallen
Datenherkunft:IDAweb
Stundenhäufigkeit
Lastprofil
Betriebspunkte
W1 0.000
W2 0.000
W3 0.598
W4 0.397
W5 0.005
Stundenhäufigkeit [h/Periode]
Kälteleistung [%]
Umgebungstemperatur TA [°C]


Zürich: 0 % Klima / 100 % Prozess
Periode:01.01.2015 - 31.12.2020
Ort/Messstation:Zürich
Datenherkunft:IDAweb
Stundenhäufigkeit
Lastprofil
Betriebspunkte
W1 0.328
W2 0.366
W3 0.229
W4 0.071
W5 0.007
Stundenhäufigkeit [h/Periode]
Kälteleistung [%]
Umgebungstemperatur TA [°C]

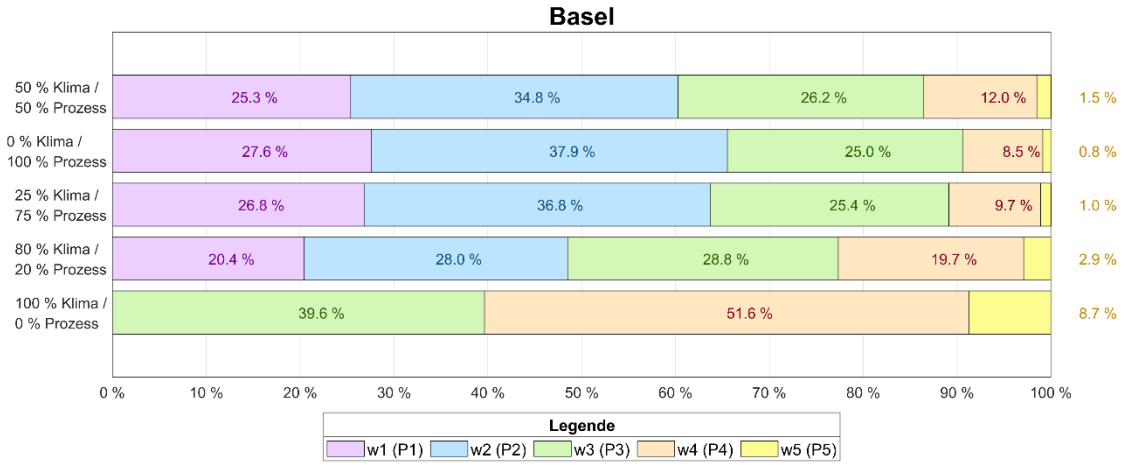

Zürich: 25 % Klima / 75 % Prozess
Periode:01.01.2015 - 31.12.2020
Ort/Messstation:Zürich
Datenherkunft:IDAweb
Stundenhäufigkeit
Lastprofil
Betriebspunkte
W1 0.320
W2 0.357
W3 0.233
W4 0.082
W5 0.008
Stundenhäufigkeit [h/Periode]
Kälteleistung [%]
Umgebungstemperatur TA [°C]

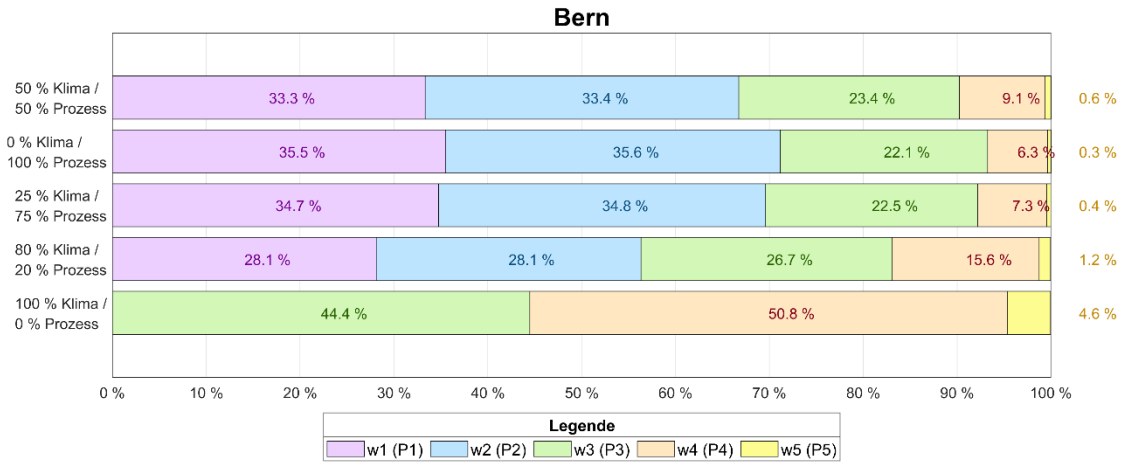

Zürich: 50 % Klima / 50 % Prozess
Periode:01.01.2015 - 31.12.2020
Ort/Messstation:Zürich
Datenherkunft:IDAweb
Stundenhäufigkeit
Lastprofil
Betriebspunkte
W1 0.305
W2 0.340
W3 0.241
W4 0.101
W5 0.012
Stundenhäufigkeit [h/Periode]
Kälteleistung [%]
Umgebungstemperatur TA [°C]

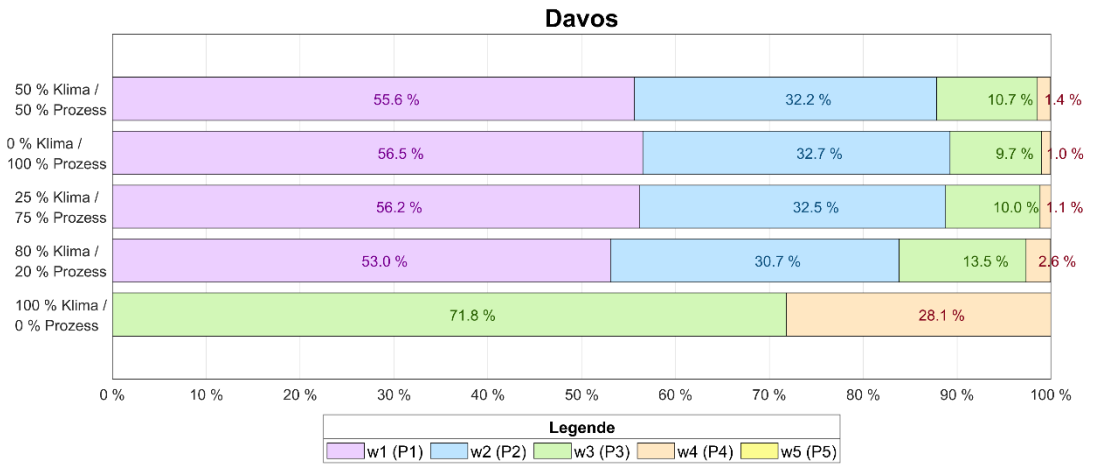

Zürich: 80 % Klima / 20 % Prozess
Periode:01.01.2015 - 31.12.2020
Ort/Messstation:Zürich
Datenherkunft:IDAweb
Stundenhäufigkeit
Lastprofil
Betriebspunkte
W1 0.253
W2 0.282
W3 0.271
W4 0.171
W5 0.023
Stundenhäufigkeit [h/Periode]
Kälteleistung [%]
Umgebungstemperatur TA [°C]

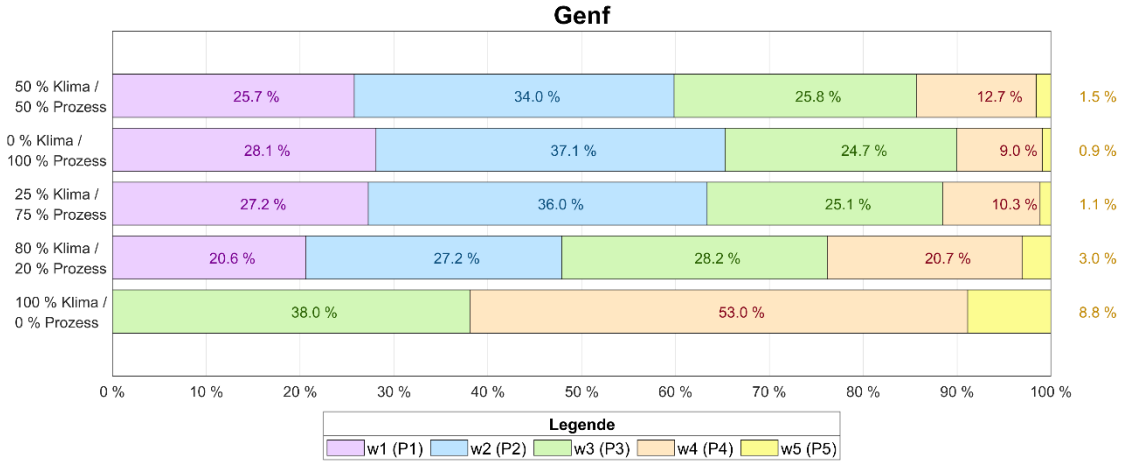


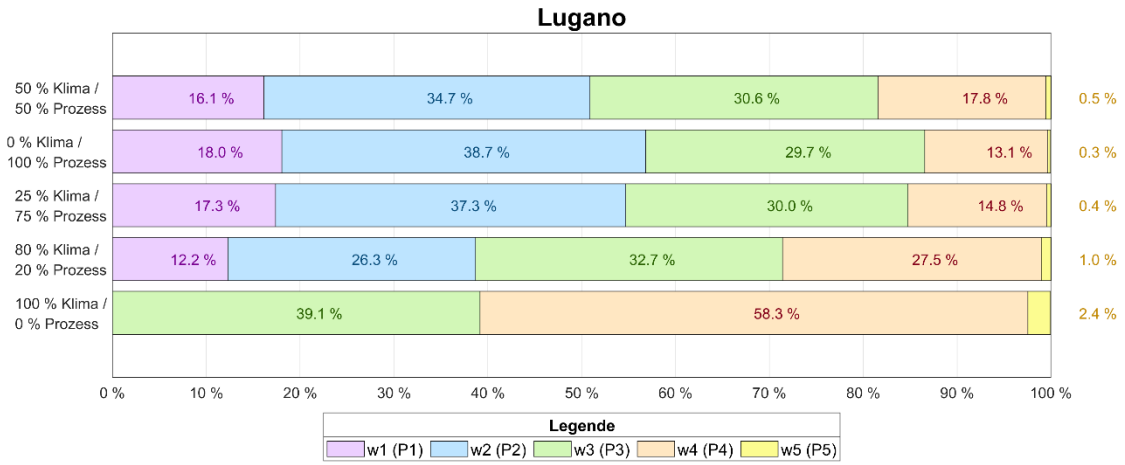
B.2 Gewichtungsfaktoren Standorte

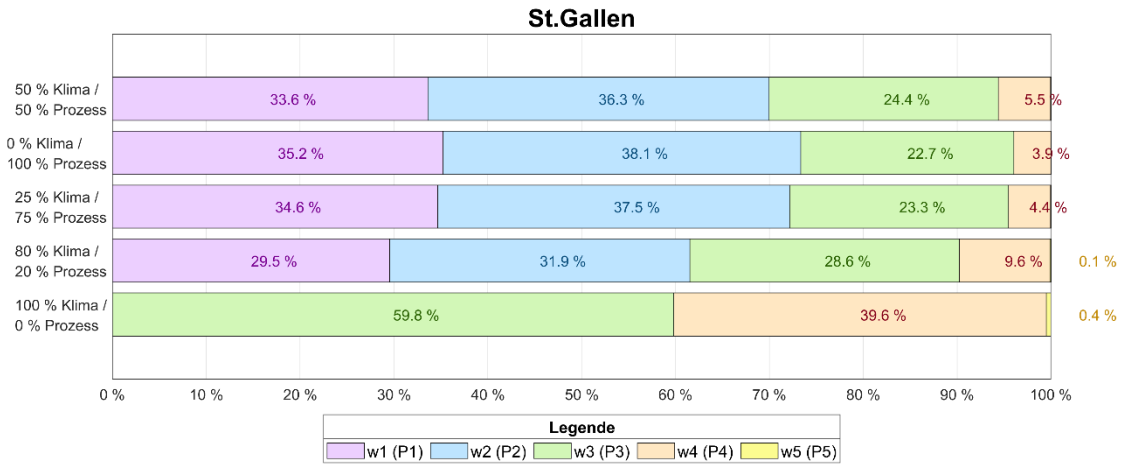


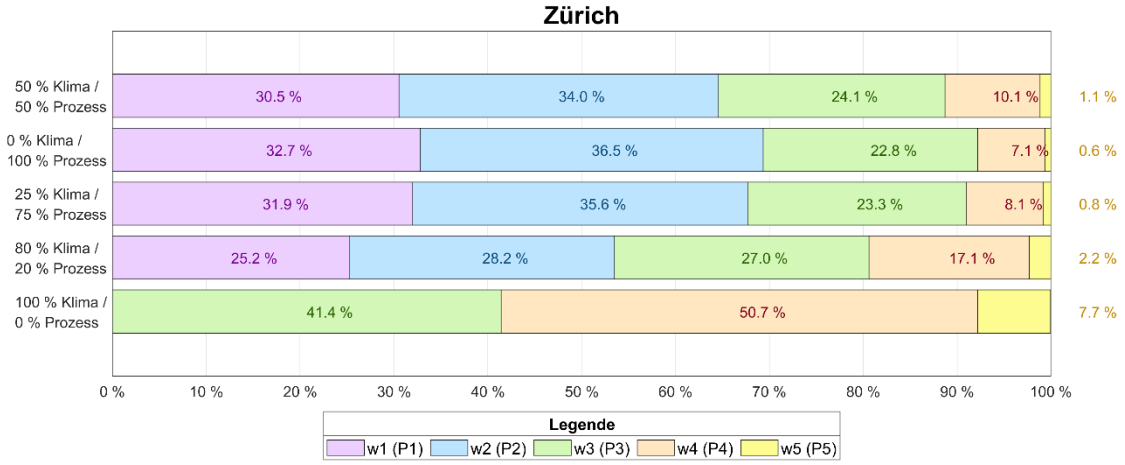

Bern
50 % Klima / 50 % Prozess
33.3 %
33.4 %
23.4 %
9.1 %
0.6 %
0 % Klima / 100 % Prozess
35.5 %
35.6 %
22.1 %
6.3 %
0.3 %
25 % Klima / 75 % Prozess
34.7 %
34.8 %
22.5 %
7.3 %
0.4 %
80 % Klima / 20 % Prozess
28.1 %
28.1 %
26.7 %
15.6 %
1.2 %
100 % Klima / 0 % Prozess
44.4 %
50.8 %
4.6 %
0 %
10 %
20 %
30 %
40 %
50 %
60 %
70 %
80 %
90 %
100 %
Legende
w1 (P1)
w2 (P2)
w3 (P3)
w4 (P4)
w5 (P5)


Davos
50 % Klima / 50 % Prozess
55.6 %
32.2 %
10.7 %
1.4 %
0 % Klima / 100 % Prozess
56.5 %
32.7 %
9.7 %
1.0 %
25 % Klima / 75 % Prozess
56.2 %
32.5 %
10.0 %
1.1 %
80 % Klima / 20 % Prozess
53.0 %
30.7 %
13.5 %
2.6 %
100 % Klima / 0 % Prozess
71.8 %
28.1 %
0 %
10 %
20 %
30 %
40 %
50 %
60 %
70 %
80 %
90 %
100 %
Legende
w1 (P1)
w2 (P2)
w3 (P3)
w4 (P4)
w5 (P5)

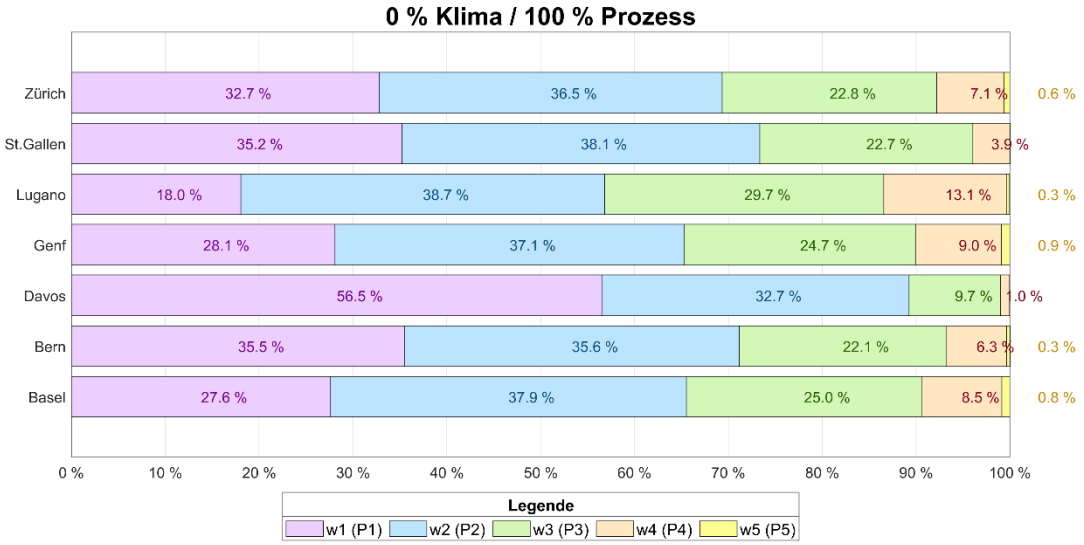

Genf
50 % Klima / 50 % Prozess
25.7 %
34.0 %
25.8 %
12.7 %
1.5 %
0 % Klima / 100 % Prozess
28.1 %
37.1 %
24.7 %
9.0 %
0.9 %
25 % Klima / 75 % Prozess
27.2 %
36.0 %
25.1 %
10.3 %
1.1 %
80 % Klima / 20 % Prozess
20.6 %
27.2 %
28.2 %
20.7 %
3.0 %
100 % Klima / 0 % Prozess
38.0 %
53.0 %
8.8 %
0 %
10 %
20 %
30 %
40 %
50 %
60 %
70 %
80 %
90 %
100 %
Legende
w1 (P1)
w2 (P2)
w3 (P3)
w4 (P4)
w5 (P5)

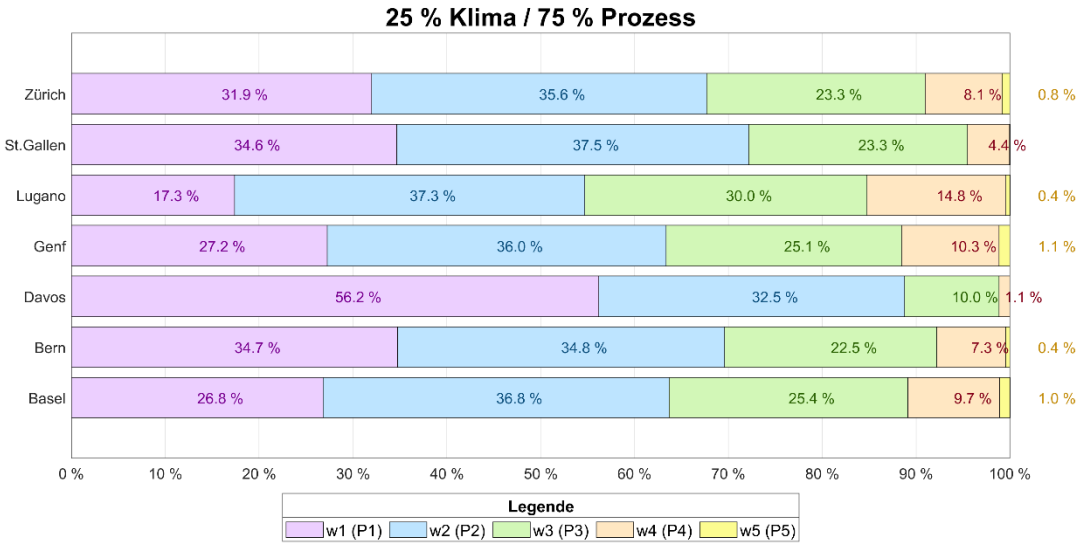

Lugano
50 % Klima / 50 % Prozess
16.1 %
34.7 %
30.6 %
17.8 %
0.5 %
0 % Klima / 100 % Prozess
18.0 %
38.7 %
29.7 %
13.1 %
0.3 %
25 % Klima / 75 % Prozess
17.3 %
37.3 %
30.0 %
14.8 %
0.4 %
80 % Klima / 20 % Prozess
12.2 %
26.3 %
32.7 %
27.5 %
1.0 %
100 % Klima / 0 % Prozess
39.1 %
58.3 %
2.4 %
0 %
10 %
20 %
30 %
40 %
50 %
60 %
70 %
80 %
90 %
100 %
Legende
w1 (P1)
w2 (P2)
w3 (P3)
w4 (P4)
w5 (P5)

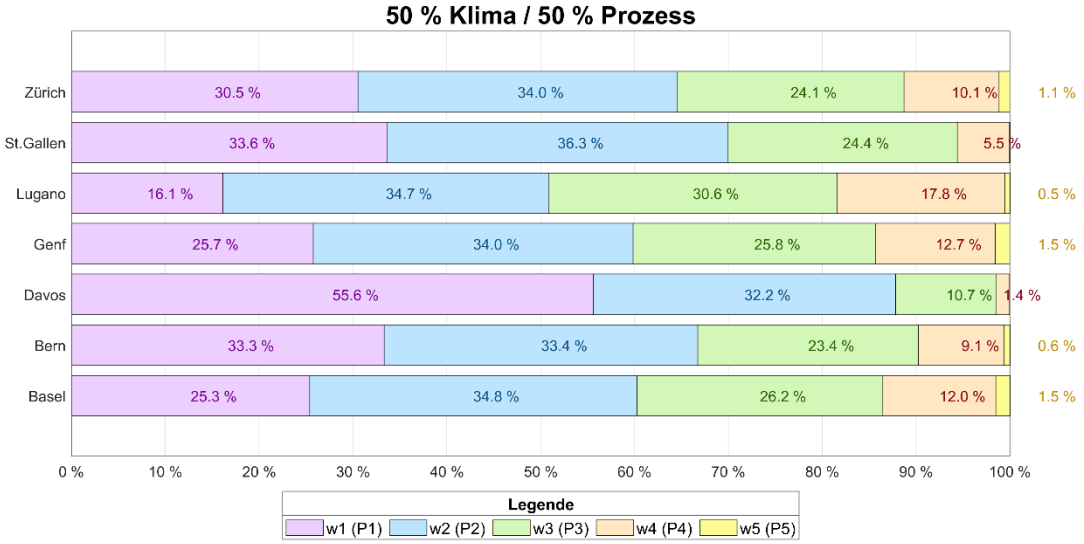

St.Gallen
50 % Klima / 50 % Prozess
33.6 %
36.3 %
24.4 %
5.5 %
0 % Klima / 100 % Prozess
35.2 %
38.1 %
22.7 %
3.9 %
25 % Klima / 75 % Prozess
34.6 %
37.5 %
23.3 %
4.4 %
80 % Klima / 20 % Prozess
29.5 %
31.9 %
28.6 %
9.6 %
0.1 %
100 % Klima / 0 % Prozess
59.8 %
39.6 %
0.4 %
0 %
10 %
20 %
30 %
40 %
50 %
60 %
70 %
80 %
90 %
100 %
Legende
w1 (P1)
w2 (P2)
w3 (P3)
w4 (P4)
w5 (P5)

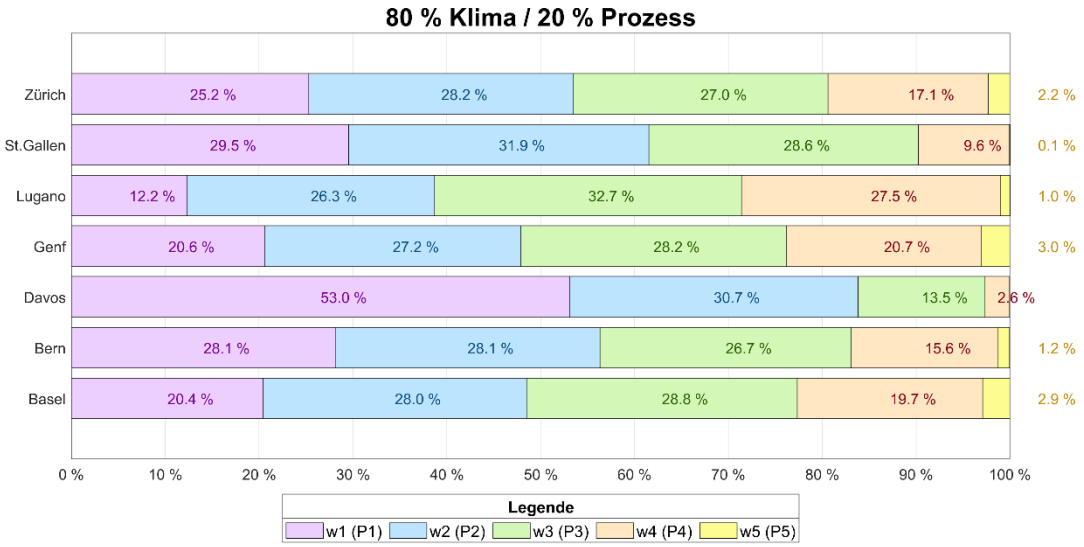

Zürich
50 % Klima / 50 % Prozess
30.5 %
34.0 %
24.1 %
10.1 %
1.1 %
0 % Klima / 100 % Prozess
32.7 %
36.5 %
22.8 %
7.1 %
0.6 %
25 % Klima / 75 % Prozess
31.9 %
35.6 %
23.3 %
8.1 %
0.8 %
80 % Klima / 20 % Prozess
25.2 %
28.2 %
27.0 %
17.1 %
2.2 %
100 % Klima / 0 % Prozess
41.4 %
50.7 %
7.7 %
0 %
10 %
20 %
30 %
40 %
50 %
60 %
70 %
80 %
90 %
100 %
Legende
w1 (P1)
w2 (P2)
w3 (P3)
w4 (P4)
w5 (P5)

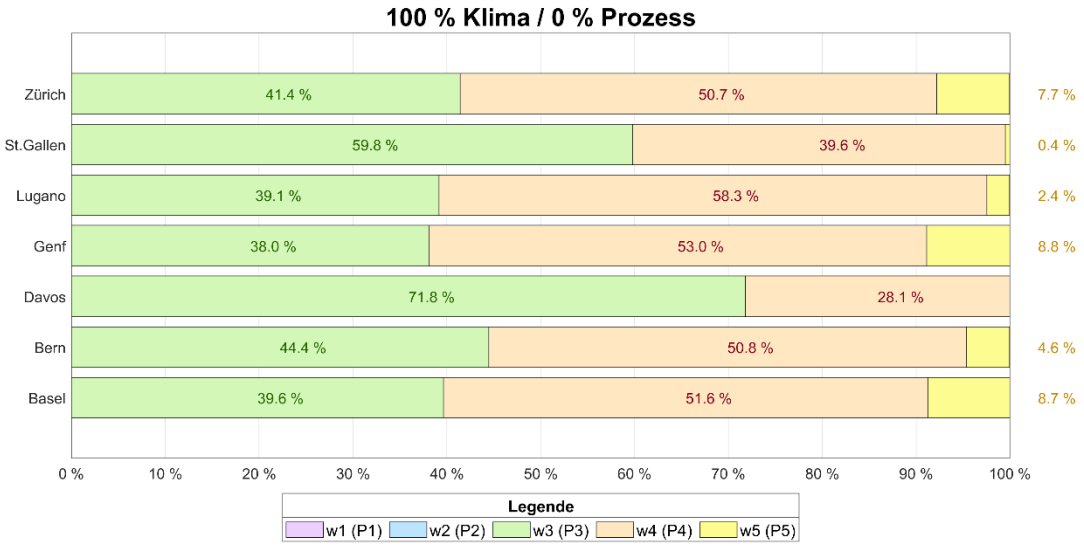
B.3 Gewichtungsfaktoren Lastprofile





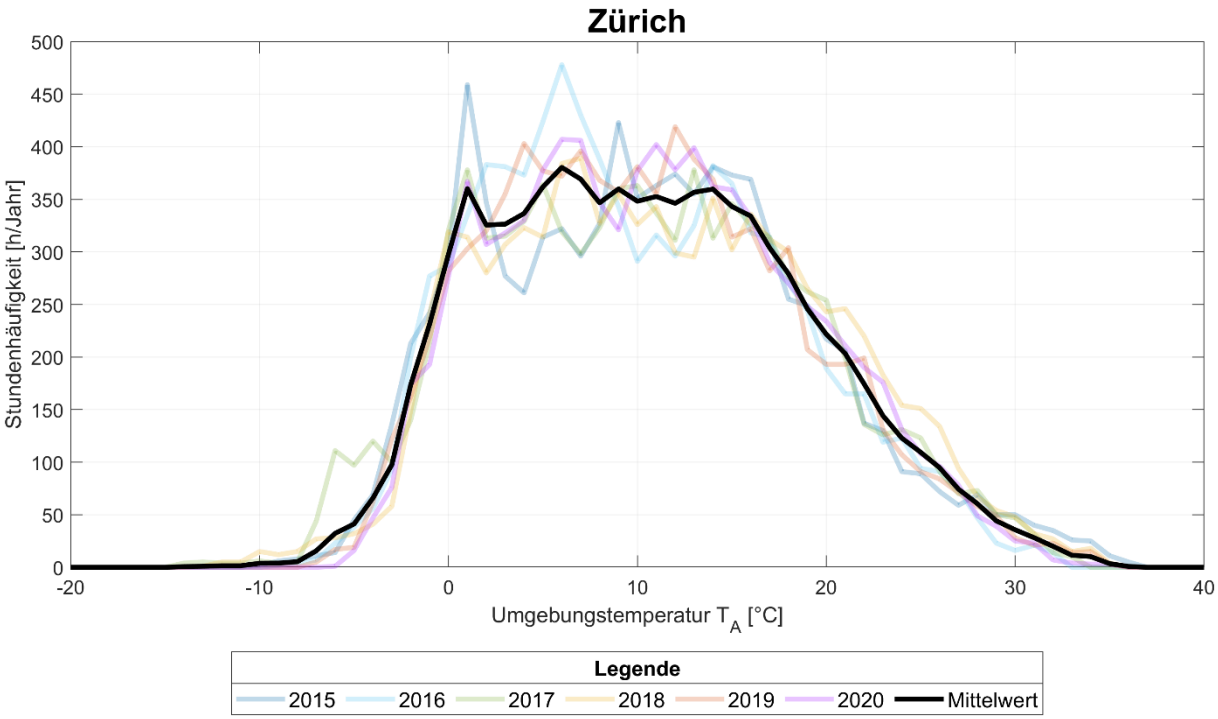

50 % Klima / 50 % Prozess
Zürich
30.5 %
34.0 %
24.1 %
10.1 %
1.1 %
St.Gallen
33.6 %
36.3 %
24.4 %
5.5 %
Lugano
16.1 %
34.7 %
30.6 %
17.8 %
0.5 %
Genf
25.7 %
34.0 %
25.8 %
12.7 %
1.5 %
Davos
55.6 %
32.2 %
10.7 %
1.4 %
Bern
33.3 %
33.4 %
23.4 %
9.1 %
0.6 %
Basel
25.3 %
34.8 %
26.2 %
12.0 %
1.5 %
0 % 10 % 20 % 30 % 40 % 50 % 60 % 70 % 80 % 90 % 100 %
Legende
w1 (P1) w2 (P2) w3 (P3) w4 (P4) w5 (P5)

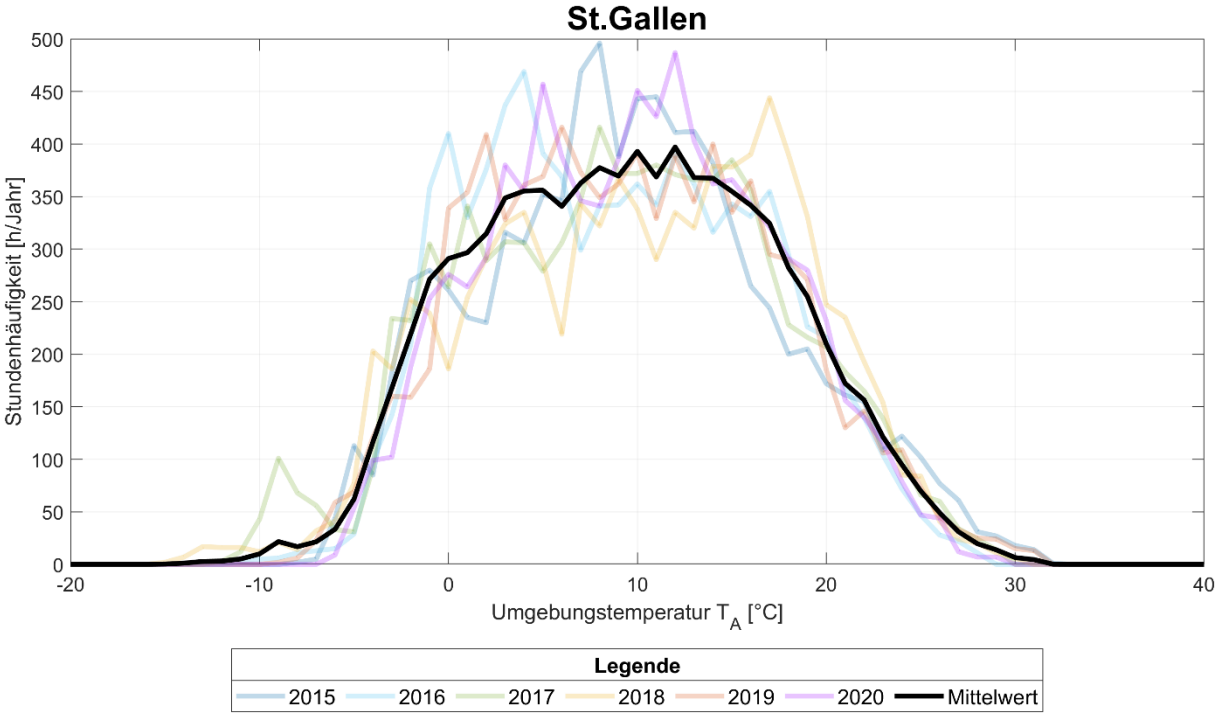

80 % Klima / 20 % Prozess
Zürich
25.2 %
28.2 %
27.0 %
17.1 %
2.2 %
St.Gallen
29.5 %
31.9 %
28.6 %
9.6 %
0.1 %
Lugano
12.2 %
26.3 %
32.7 %
27.5 %
1.0 %
Genf
20.6 %
27.2 %
28.2 %
20.7 %
3.0 %
Davos
53.0 %
30.7 %
13.5 %
2.6 %
Bern
28.1 %
28.1 %
26.7 %
15.6 %
1.2 %
Basel
20.4 %
28.0 %
28.8 %
19.7 %
2.9 %
0 % 10 % 20 % 30 % 40 % 50 % 60 % 70 % 80 % 90 % 100 %
Legende
w1 (P1) w2 (P2) w3 (P3) w4 (P4) w5 (P5)

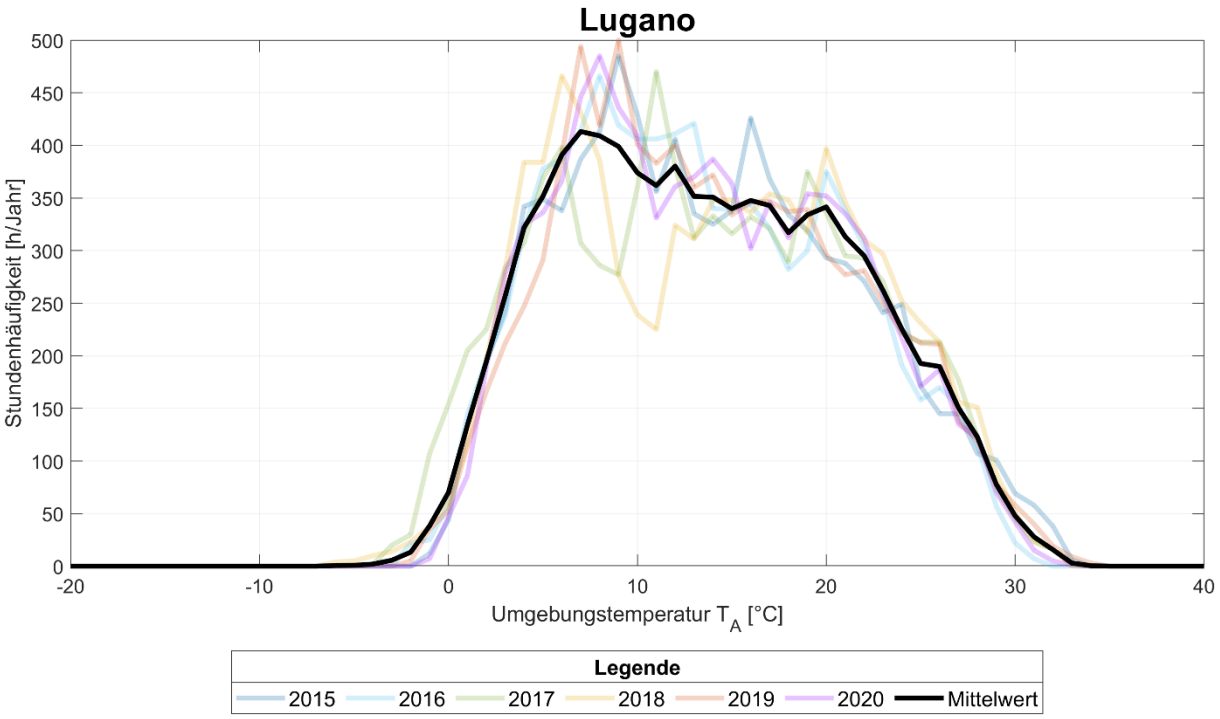


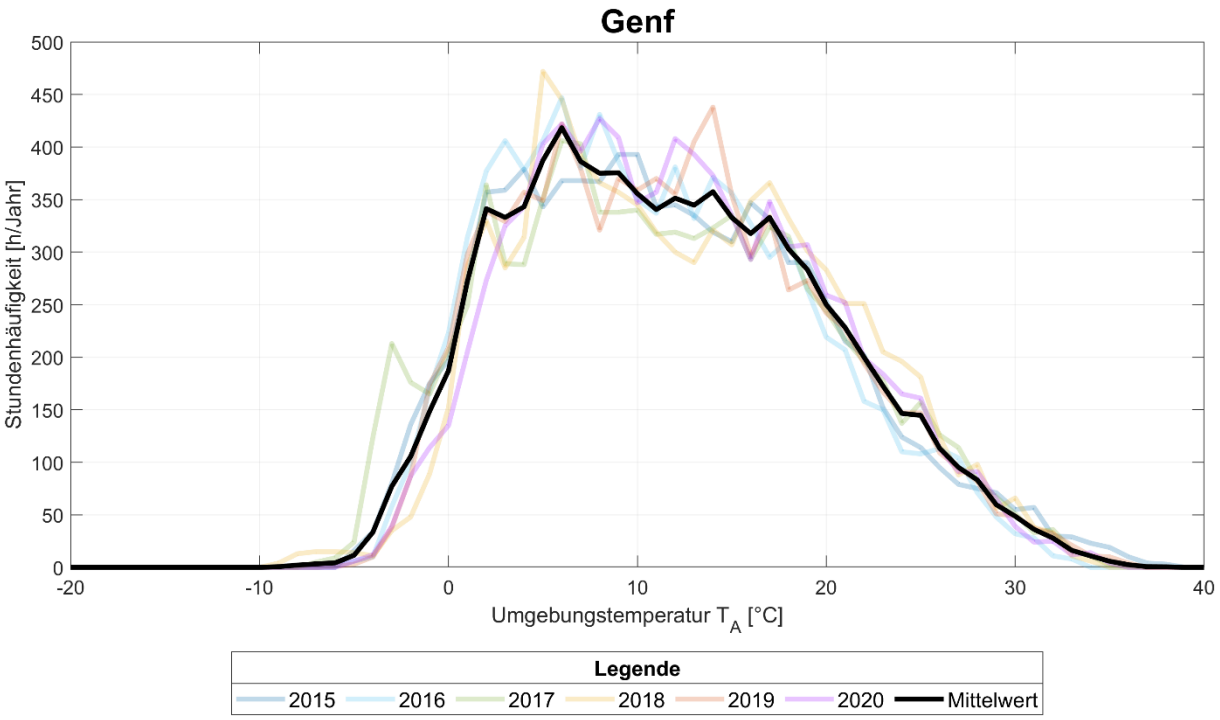
C. Anhang - Wetterdaten

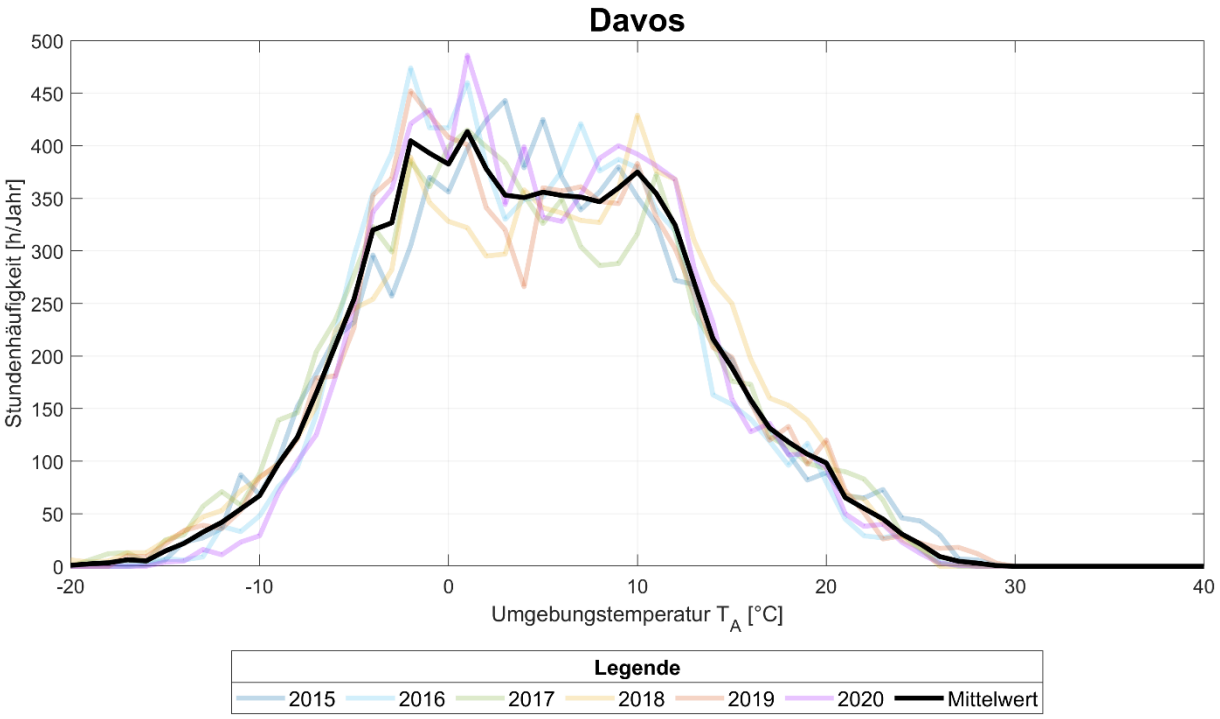
C.1 Stundenhäufigkeit Umgebungstemperatur Standorte

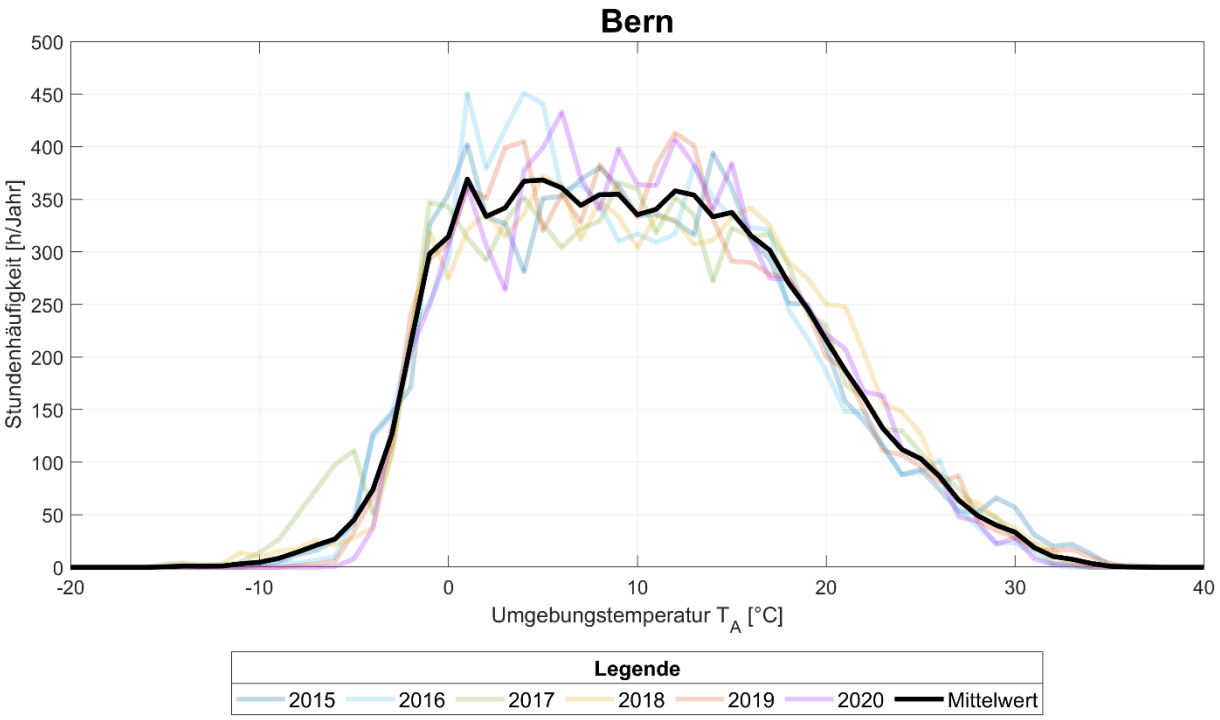


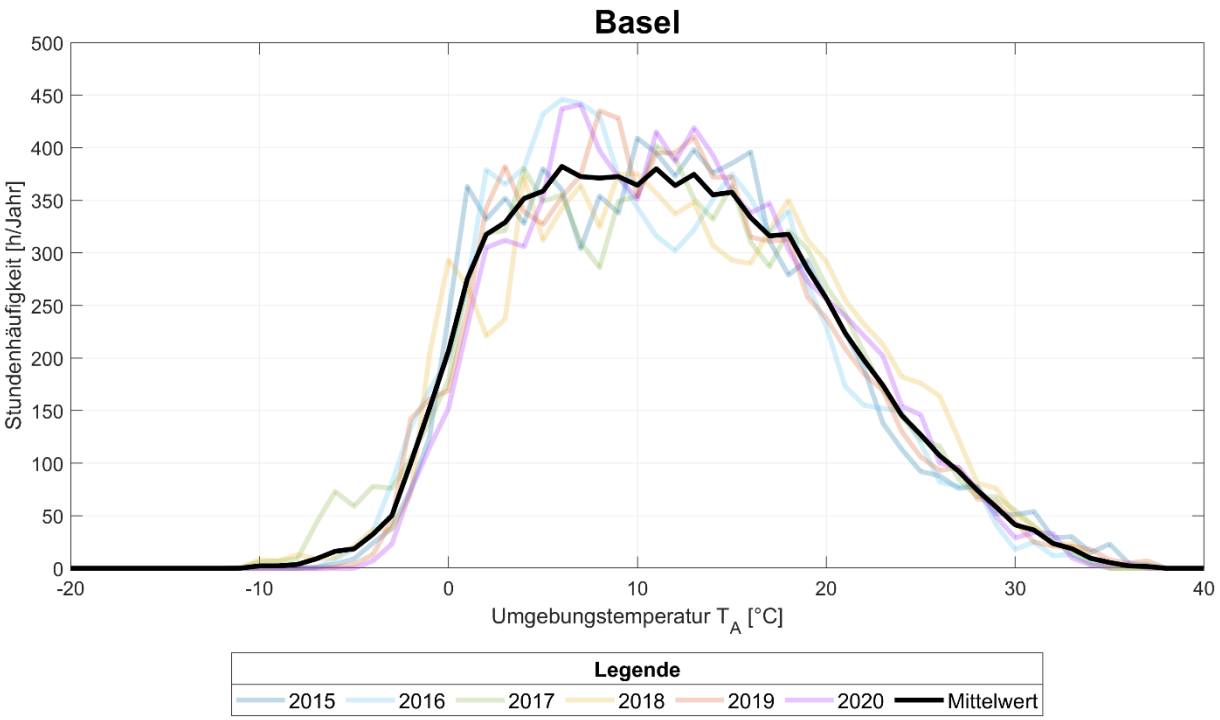

St.Gallen
Stundenhäufigkeit [h/Jahr]
500
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
-20
-10
0
10
20
30
40
Umgebungstemperatur T_A [°C]
Legende
2015
2016
2017
2018
2019
2020
Mittelwert


Lugano
Stundenhäufigkeit [h/Jahr]
500
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
-20
-10
0
10
20
30
40
Umgebungstemperatur T_A [°C]
Legende
2015
2016
2017
2018
2019
2020
Mittelwert

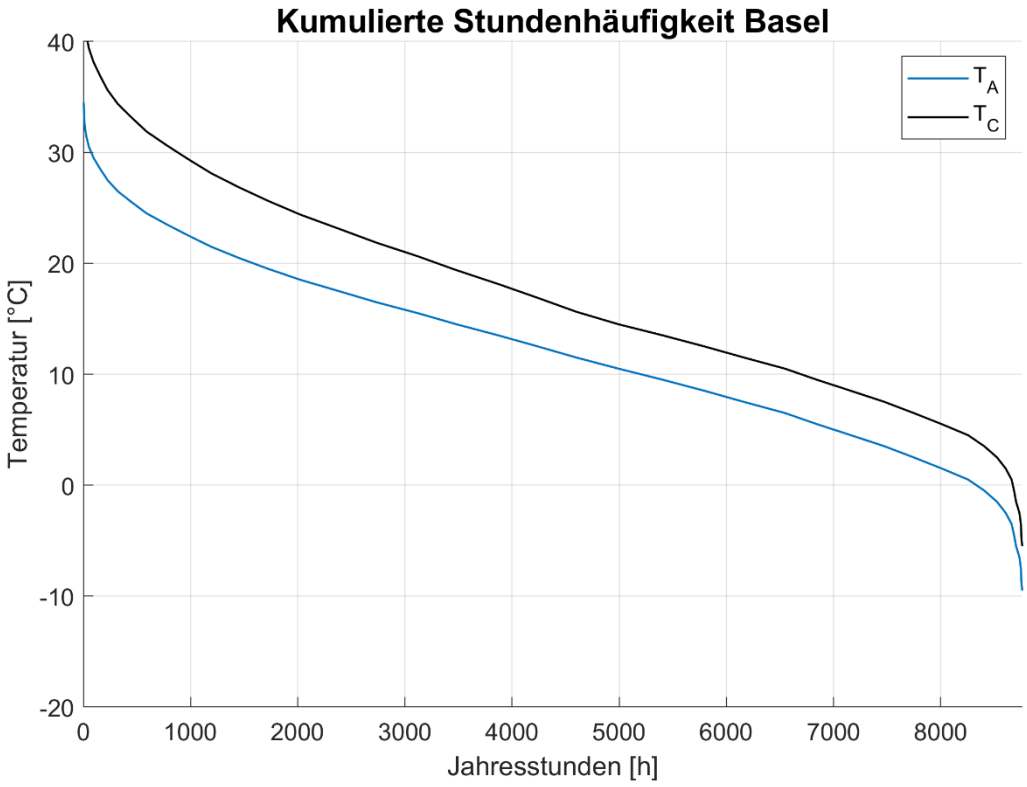

Genf
Stundenhäufigkeit [h/Jahr]
Umgebungstemperatur T_A [°C]
Legende
2015
2016
2017
2018
2019
2020
Mittelwert

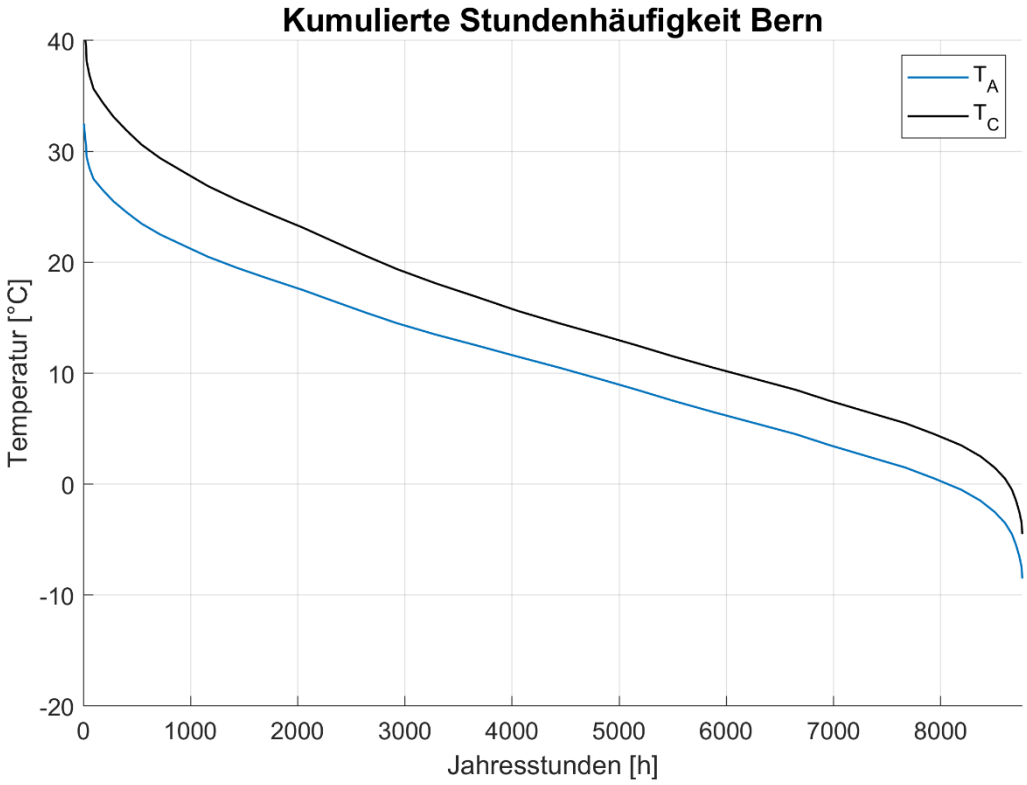

Davos
Stundenhäufigkeit [h/Jahr]
Umgebungstemperatur T_A [°C]
Legende
2015
2016
2017
2018
2019
2020
Mittelwert

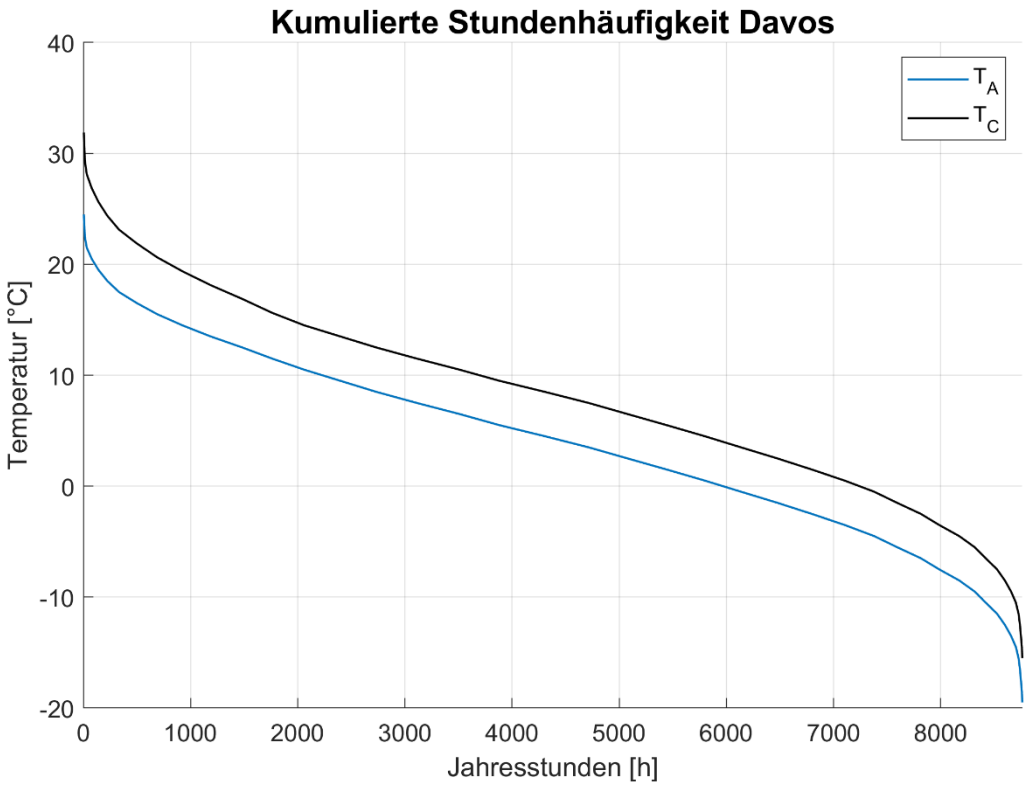

Bern
Stundenhäufigkeit [h/Jahr]
Umgebungstemperatur T_A [°C]
Legende
2015
2016
2017
2018
2019
2020
Mittelwert

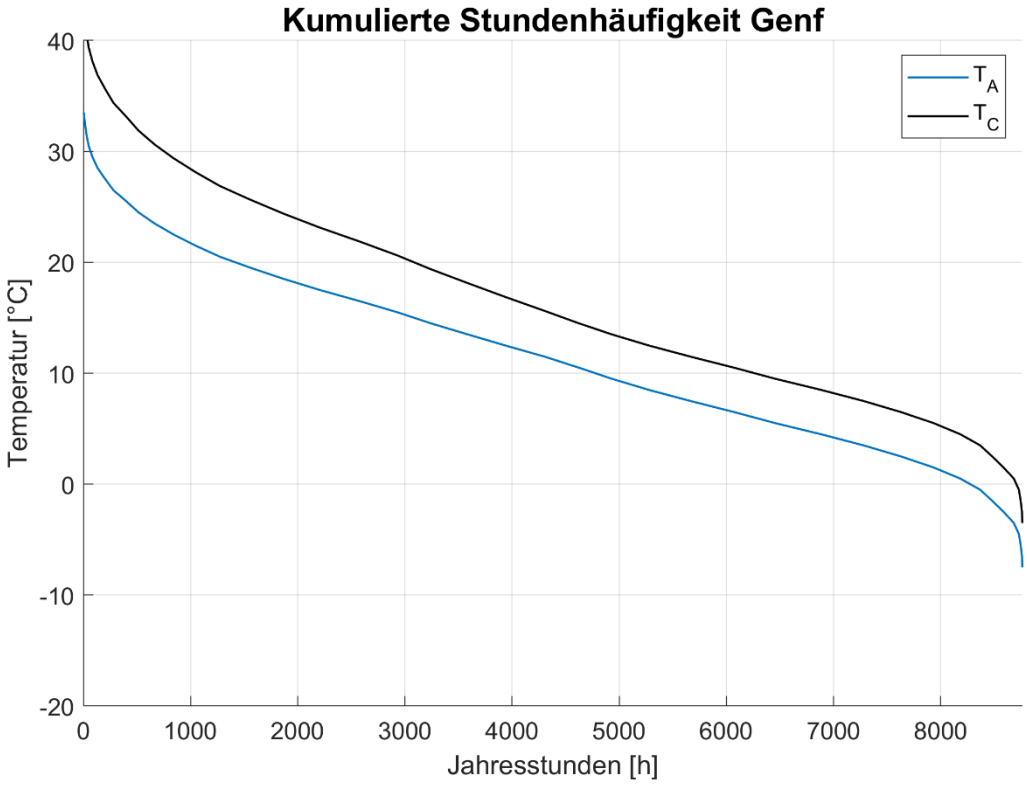

Basel
Stundenhäufigkeit [h/Jahr]
Umgebungstemperatur T_A [°C]
Legende
2015
2016
2017
2018
2019
2020
Mittelwert

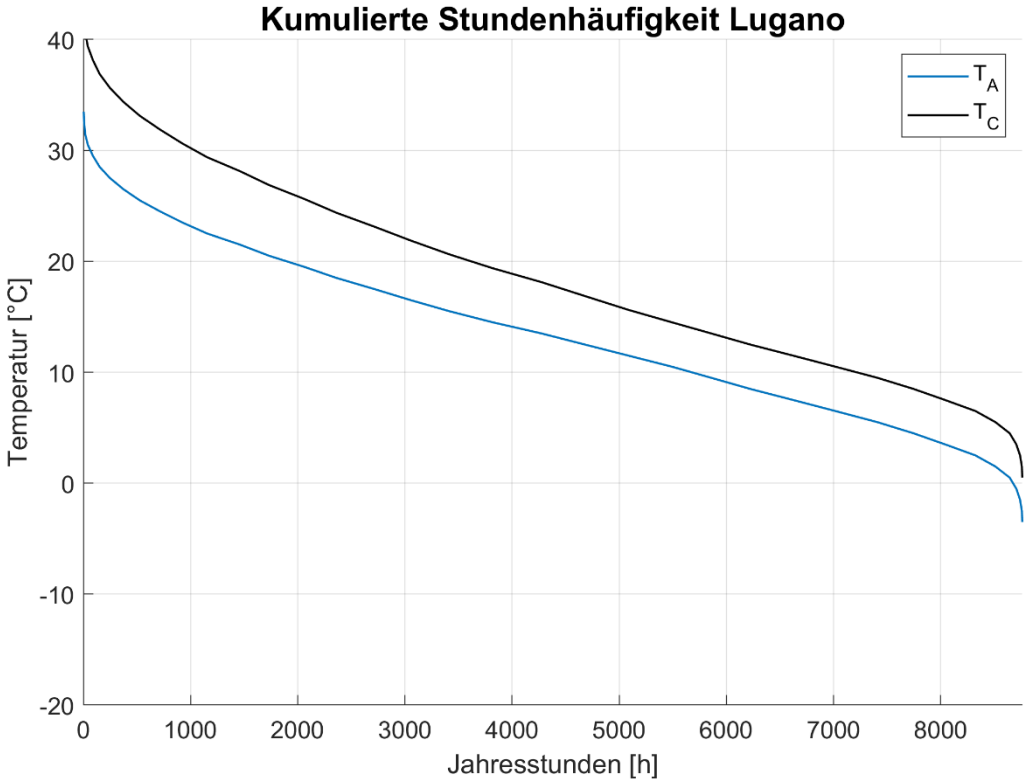
C.2 Kumulierte Stundenhäufigkeit Standorte

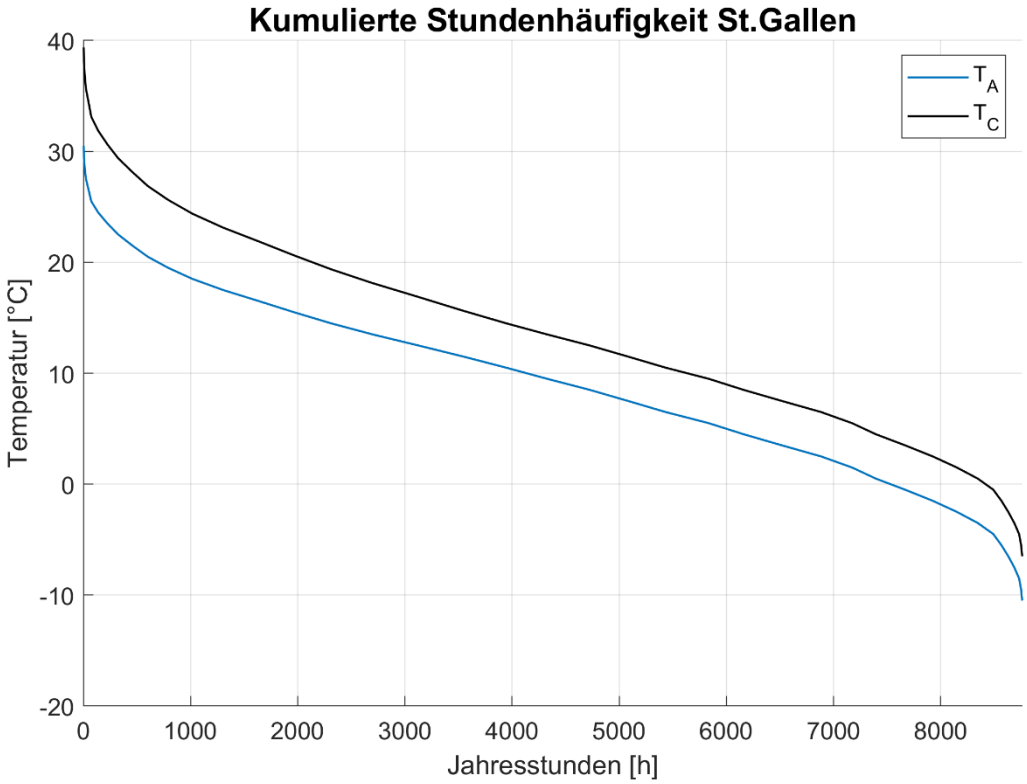


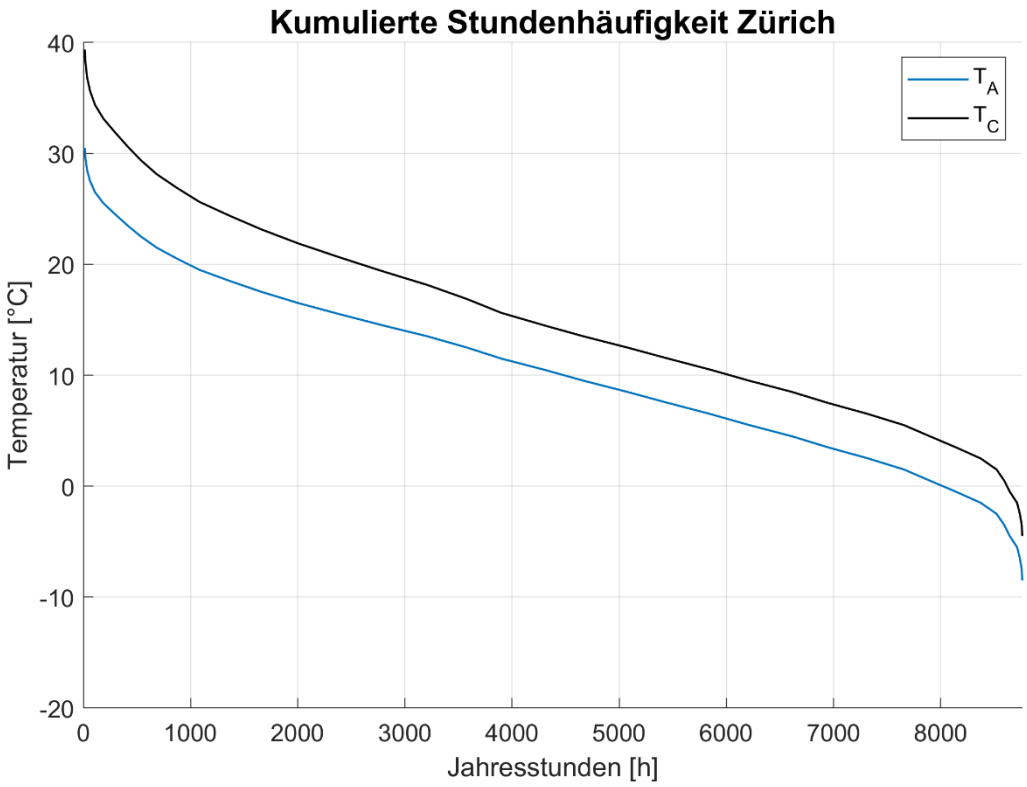



Kumulierte Stundenhäufigkeit Davos
T_A
T_C
Temperatur [°C]
Jahresstunden [h]
40
30
20
10
0
-10
-20
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000
7000
8000


Kumulierte Stundenhäufigkeit Genf
T_A
T_C
Temperatur [°C]
Jahresstunden [h]
40
30
20
10
0
-10
-20
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000
7000
8000


Kumulierte Stundenhäufigkeit Lugano
Temperatur [°C]
Jahresstunden [h]
T_A
T_C
40
30
20
10
0
-10
-20
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000
7000
8000

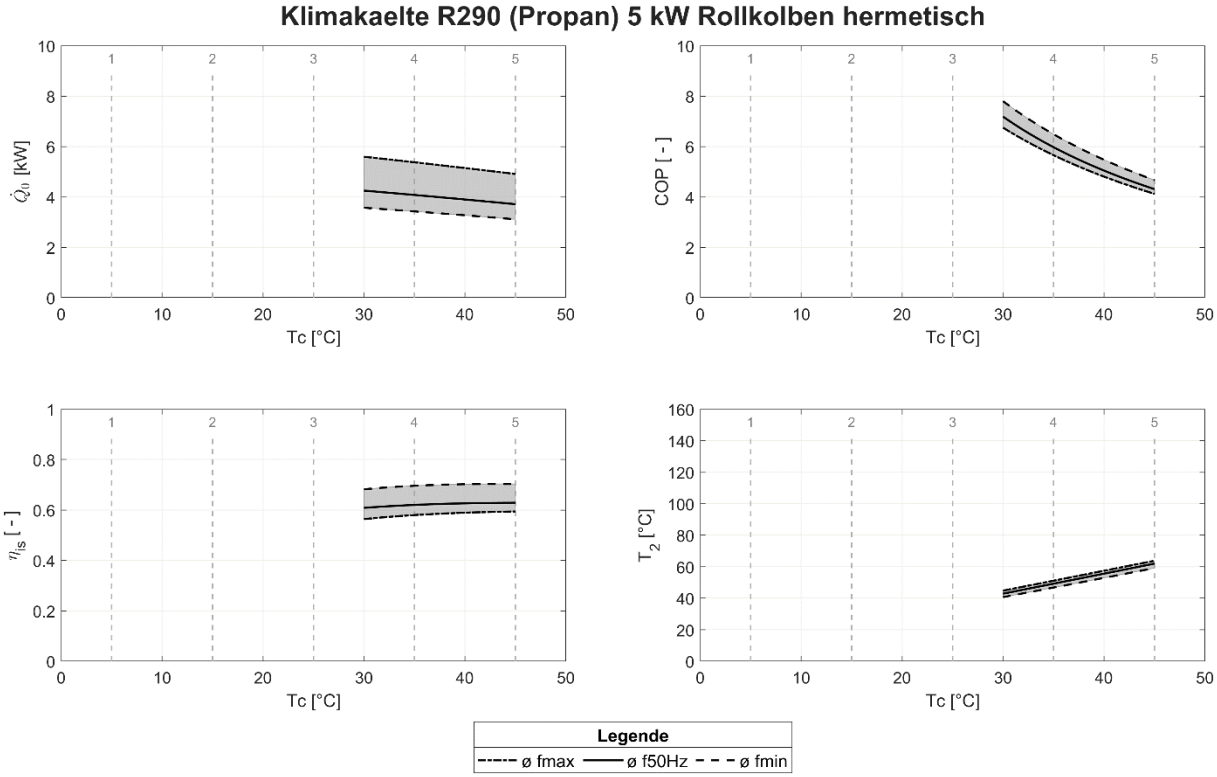

Kumulierte Stundenhäufigkeit St.Gallen
Temperatur [°C]
Jahresstunden [h]
T_A
T_C
40
30
20
10
0
-10
-20
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000
7000
8000


Kumulierte Stundenhäufigkeit Zürich
Temperatur [°C]
Jahresstunden [h]
T_A
T_C
40
30
20
10
0
-10
-20
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000
7000
8000

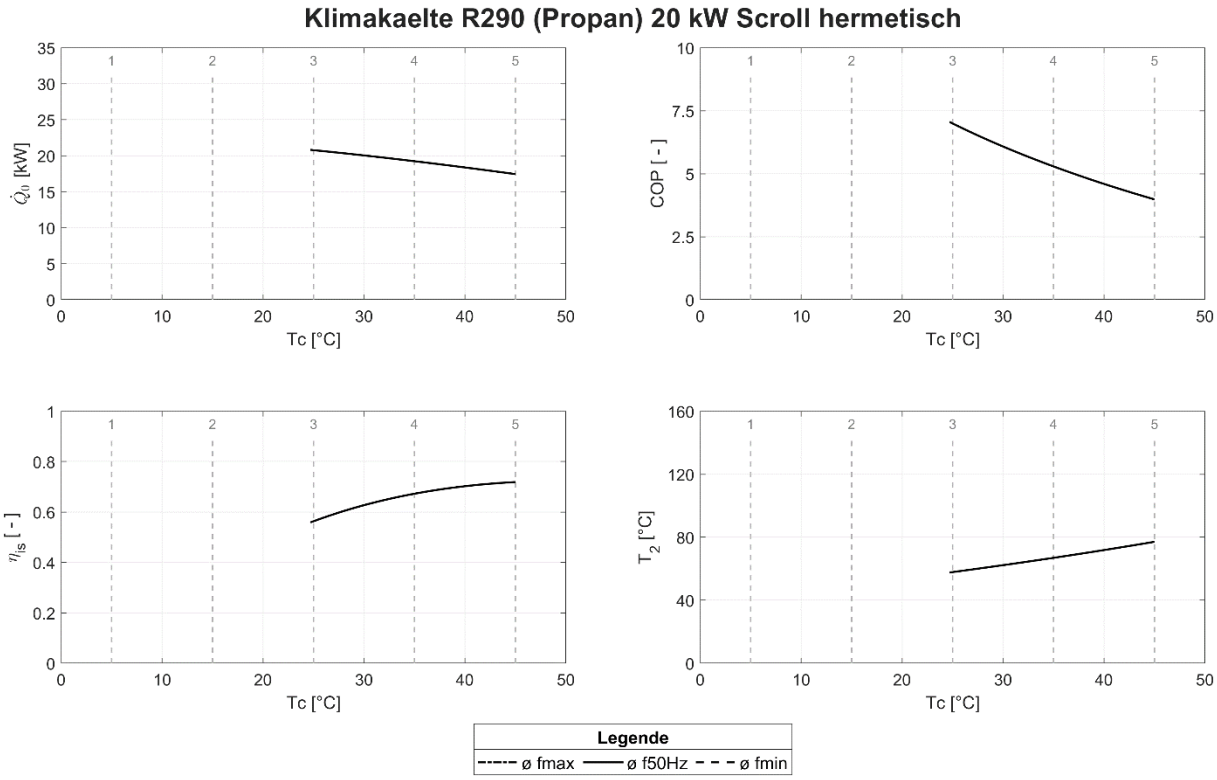
D. Anhang - Verdichterkennfelder

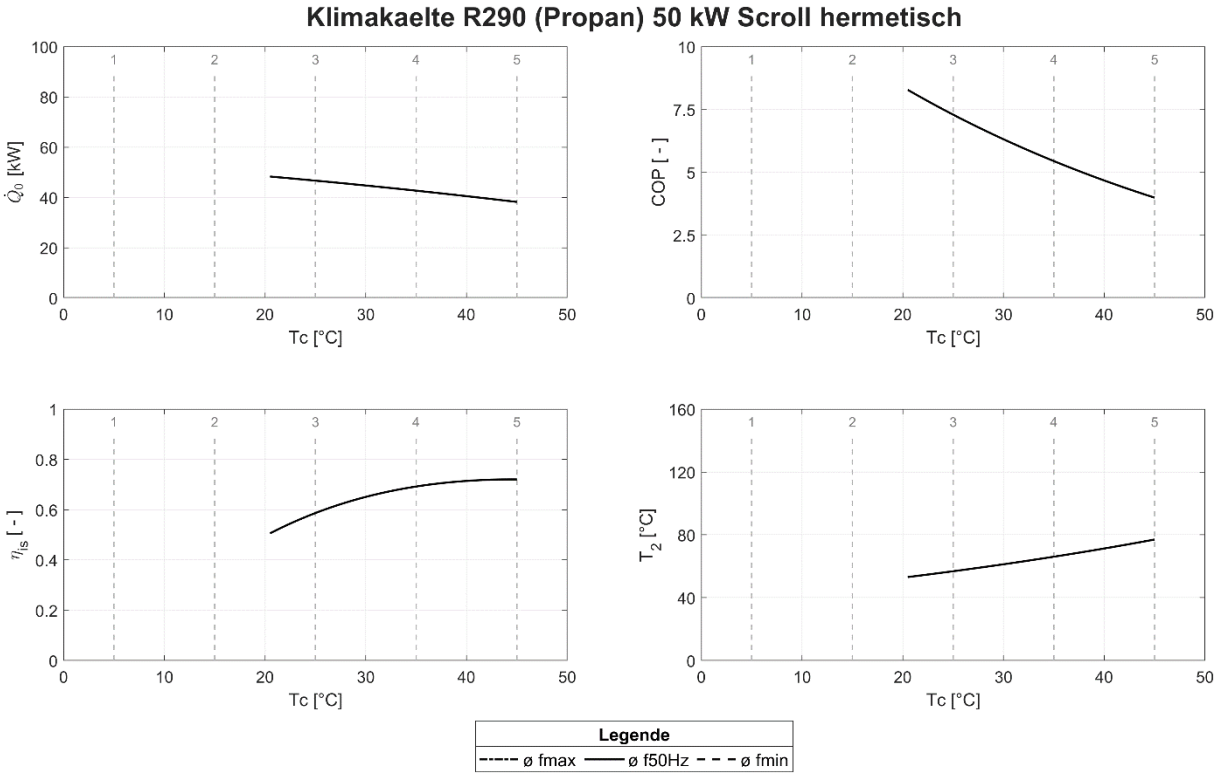
D.1 Verdichterkennfelder Klimakälte

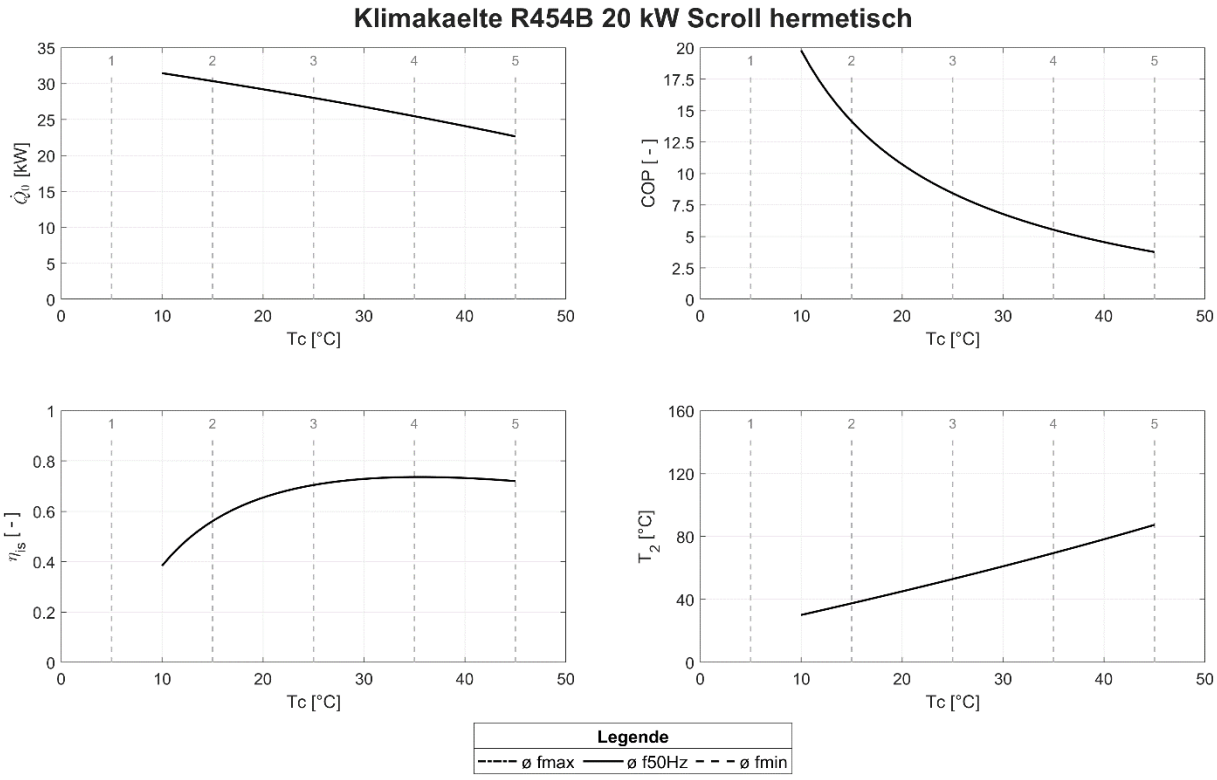
D.1.1 Rollkolben Klimakälte

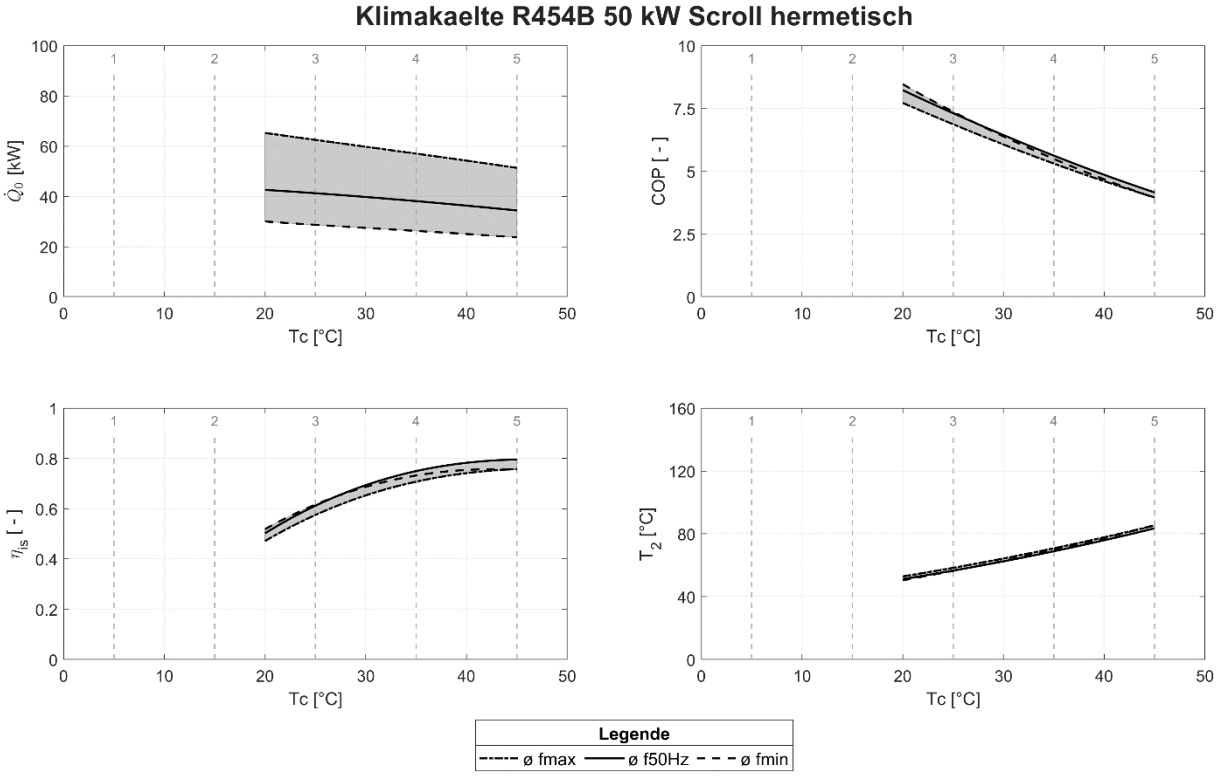


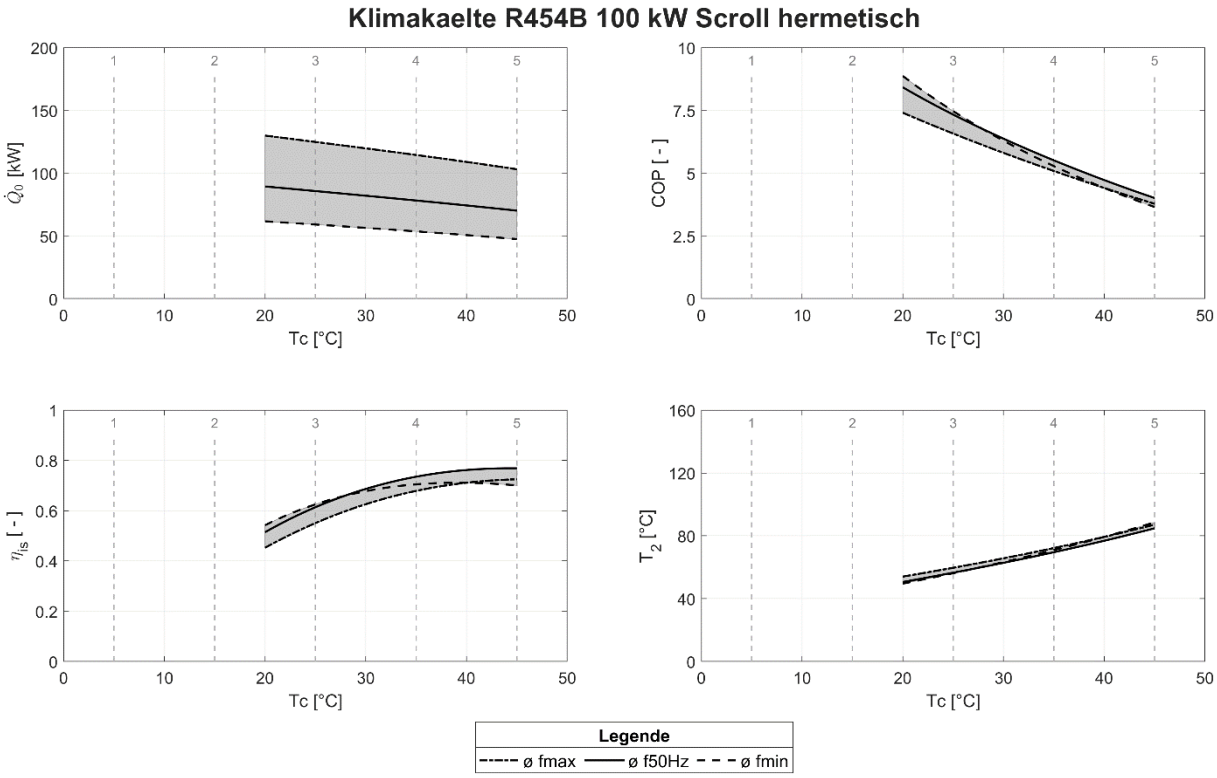
D.1.2 Scroll Klimakälte

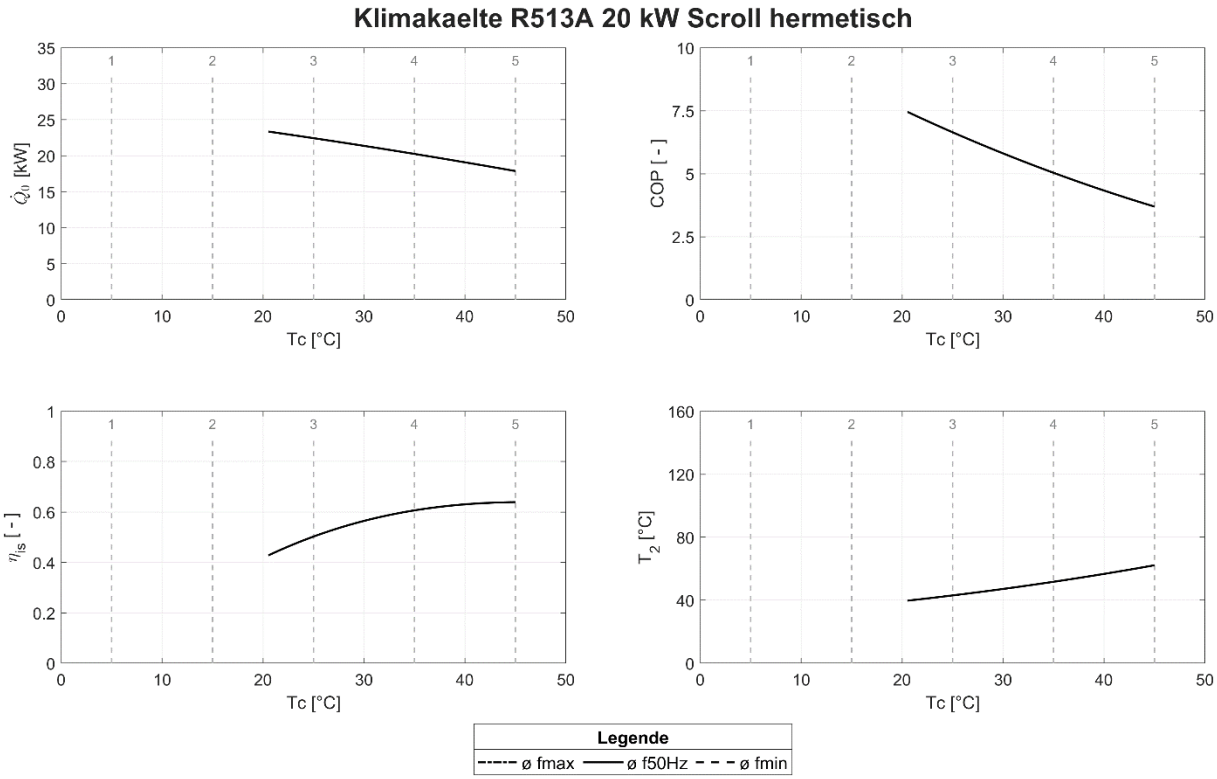




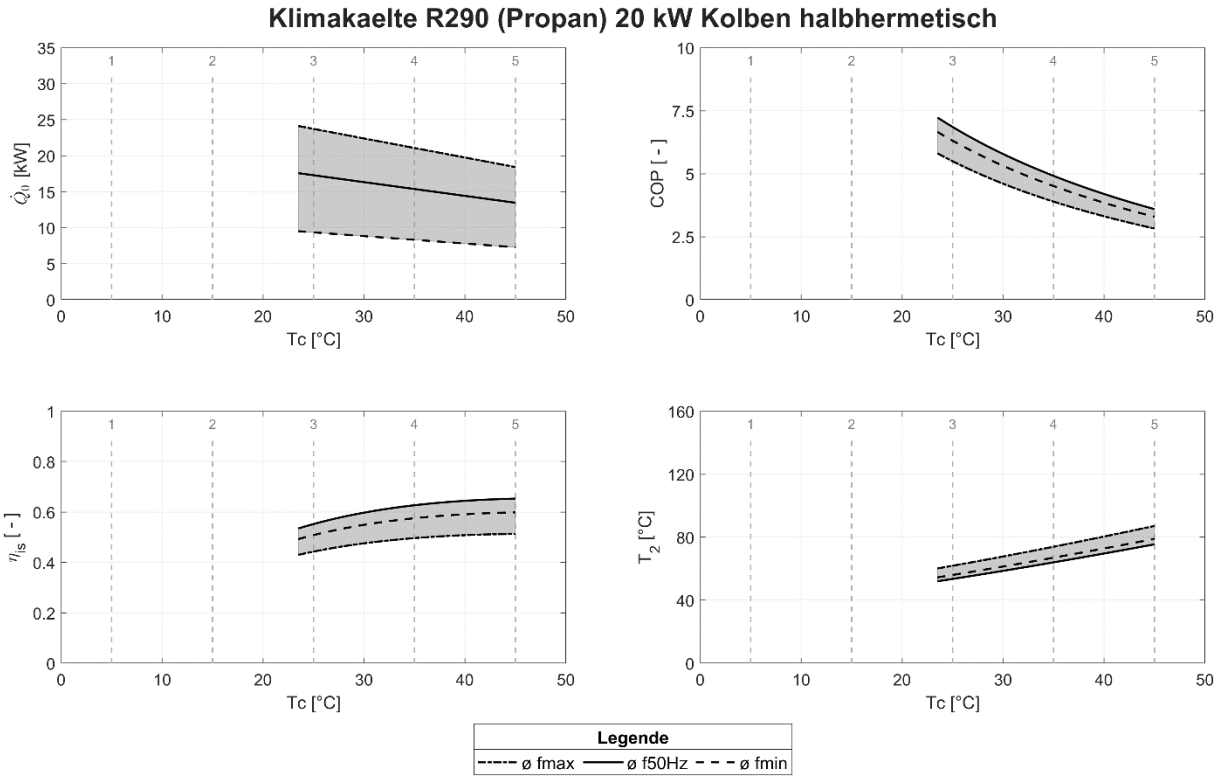

Klimakaelte R454B 20 kW Scroll hermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

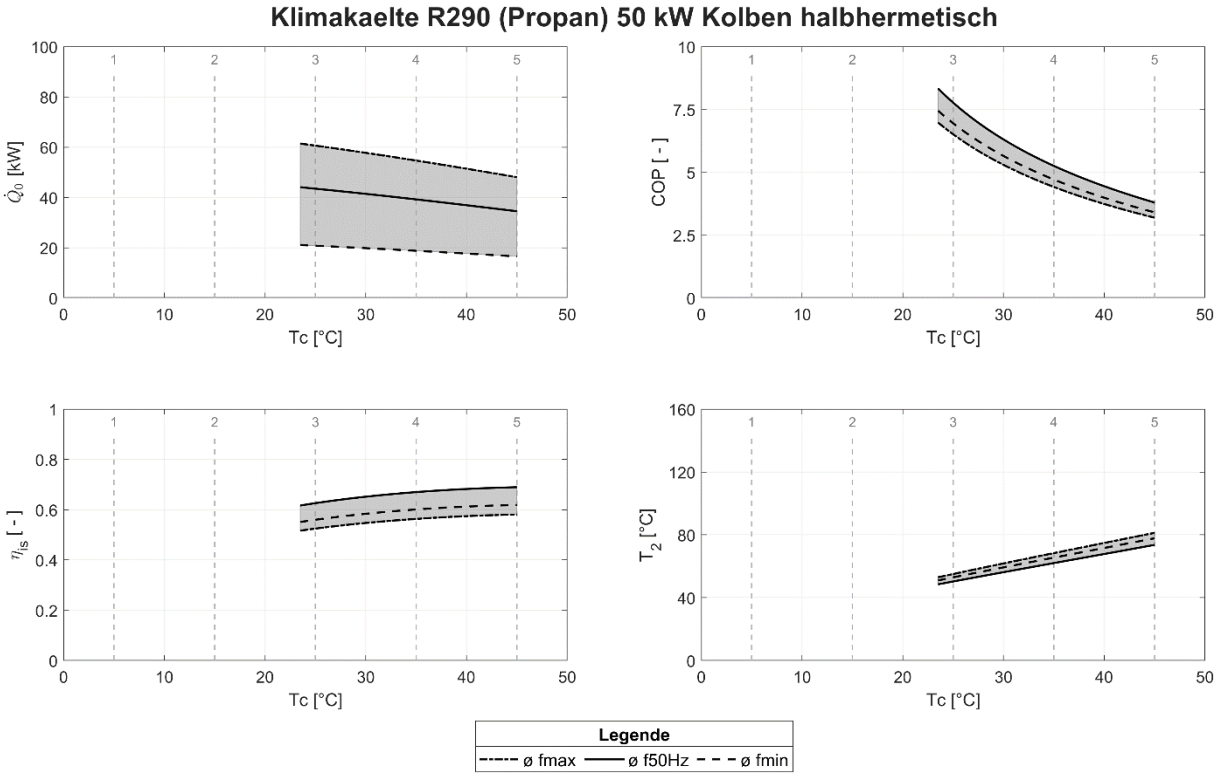

Klimakaelte R454B 50 kW Scroll hermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

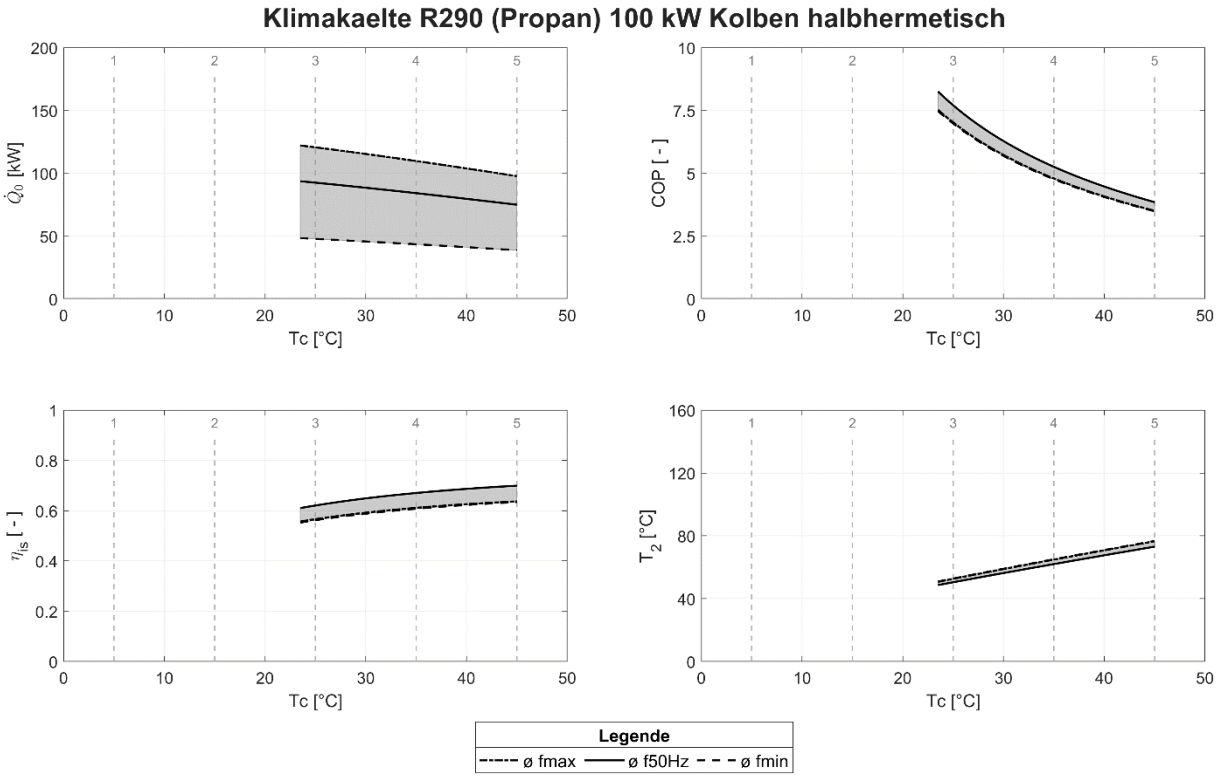

Klimakaelte R454B 100 kW Scroll hermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

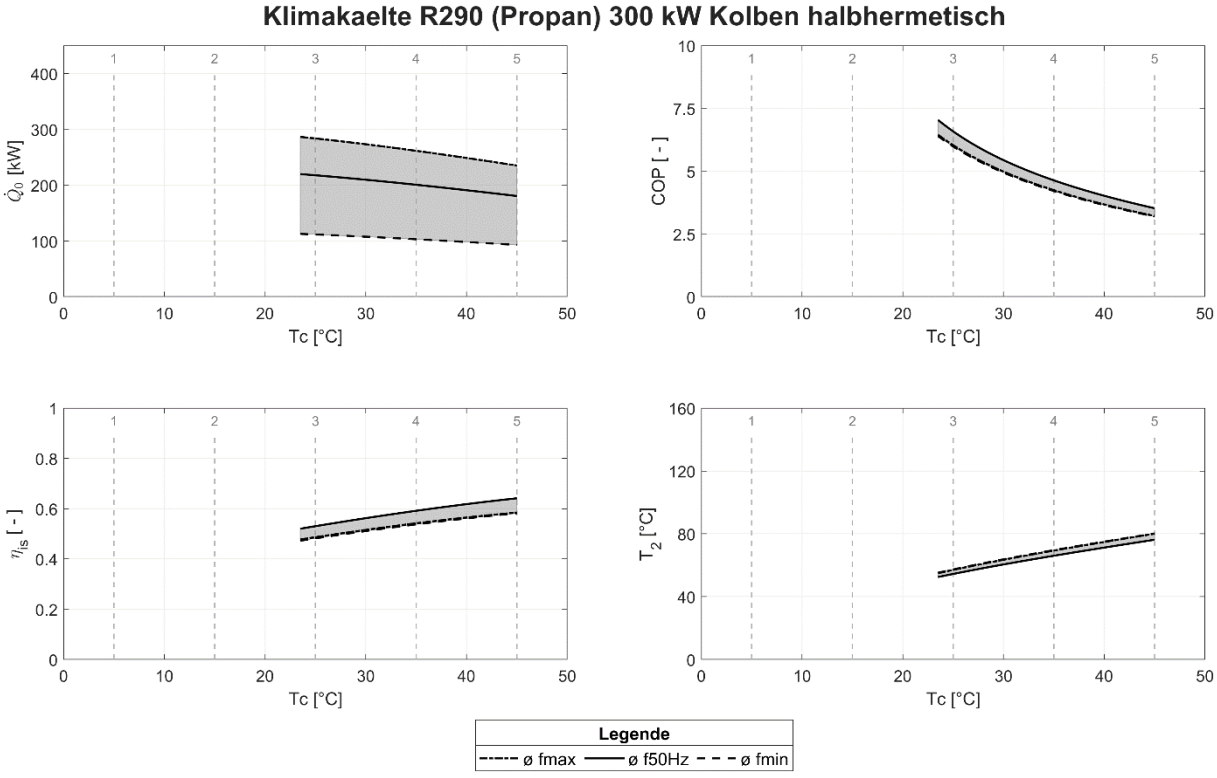

Klimakaelte R513A 20 kW Scroll hermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

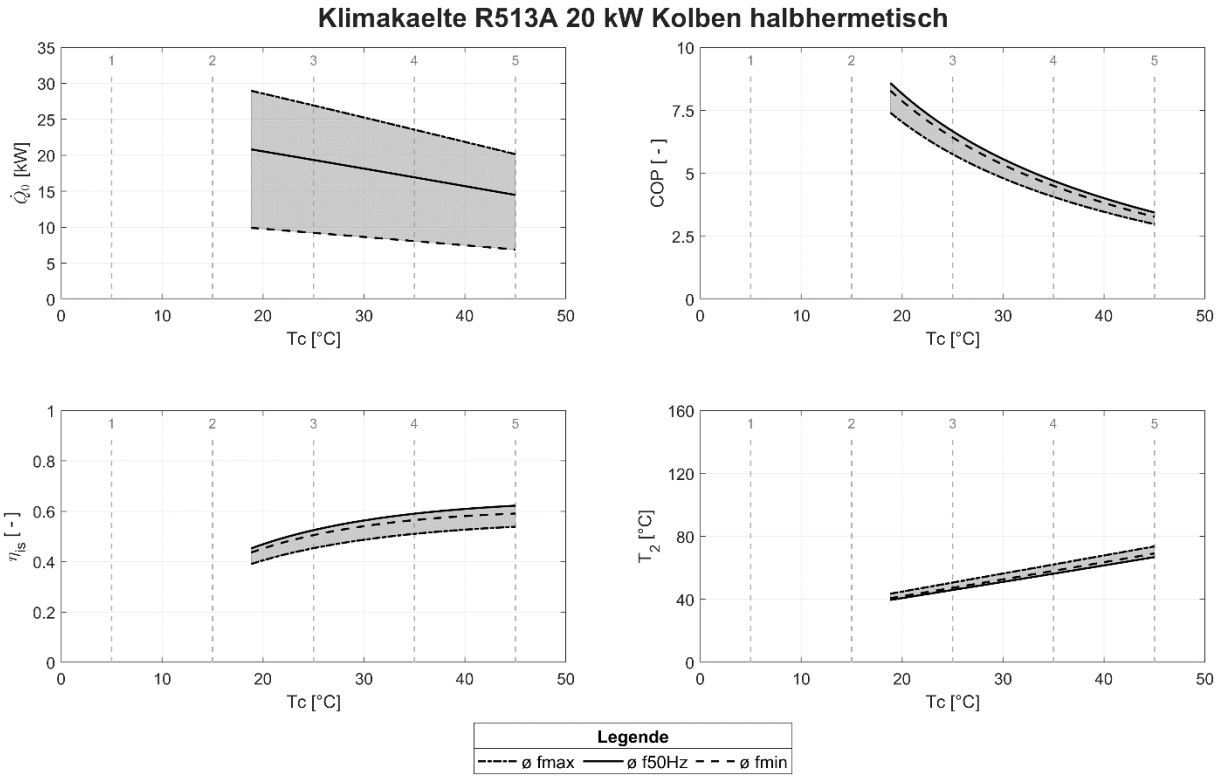
D.1.3 Hubkolben Klimakälte

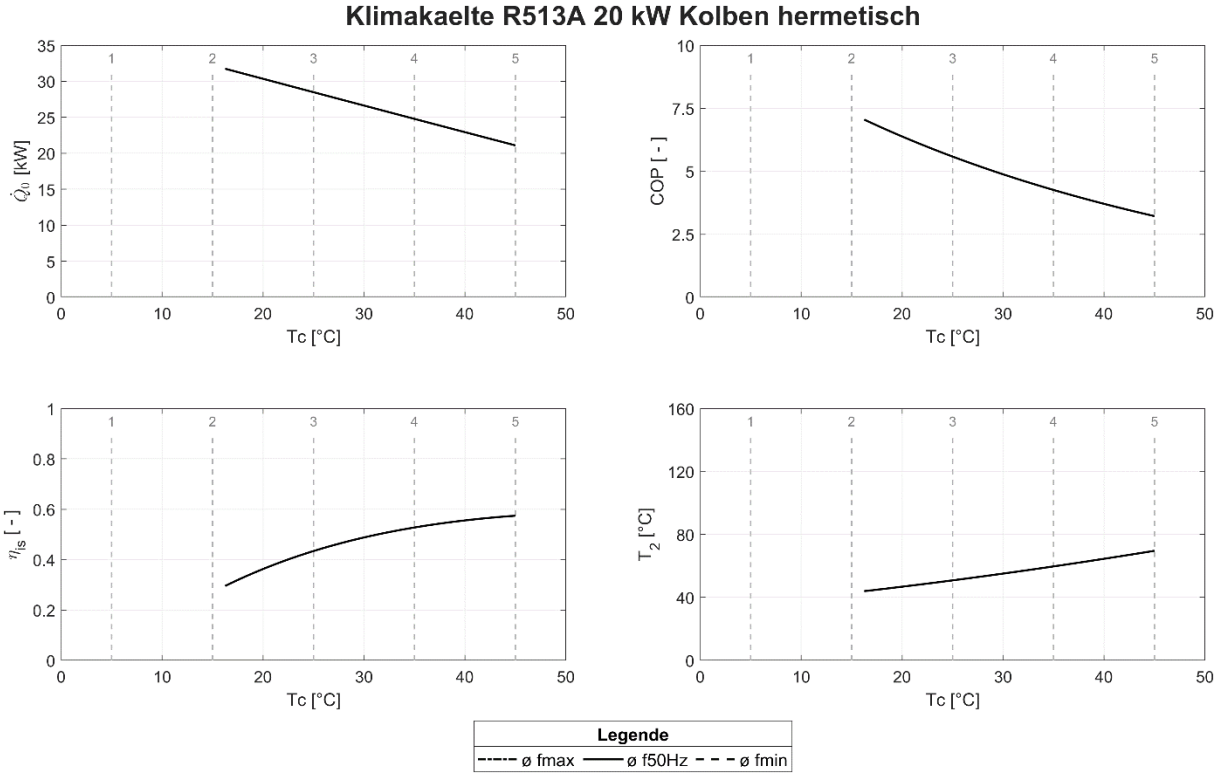


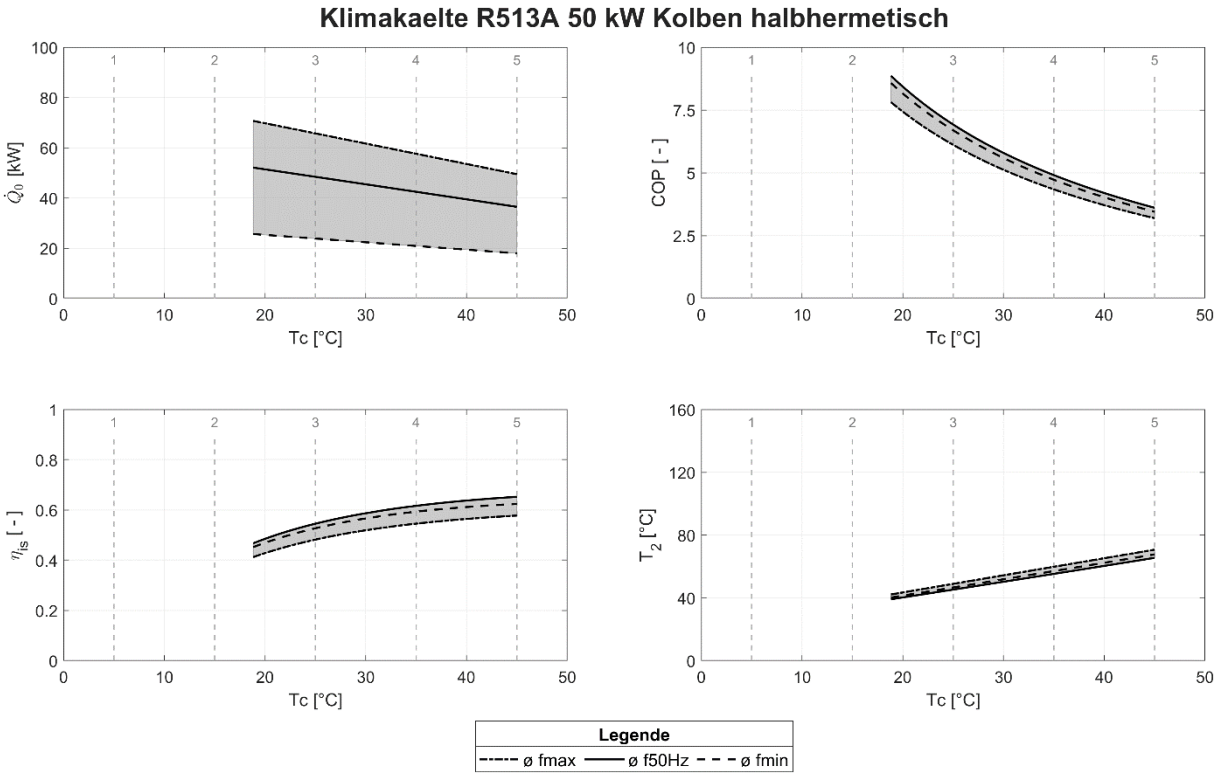


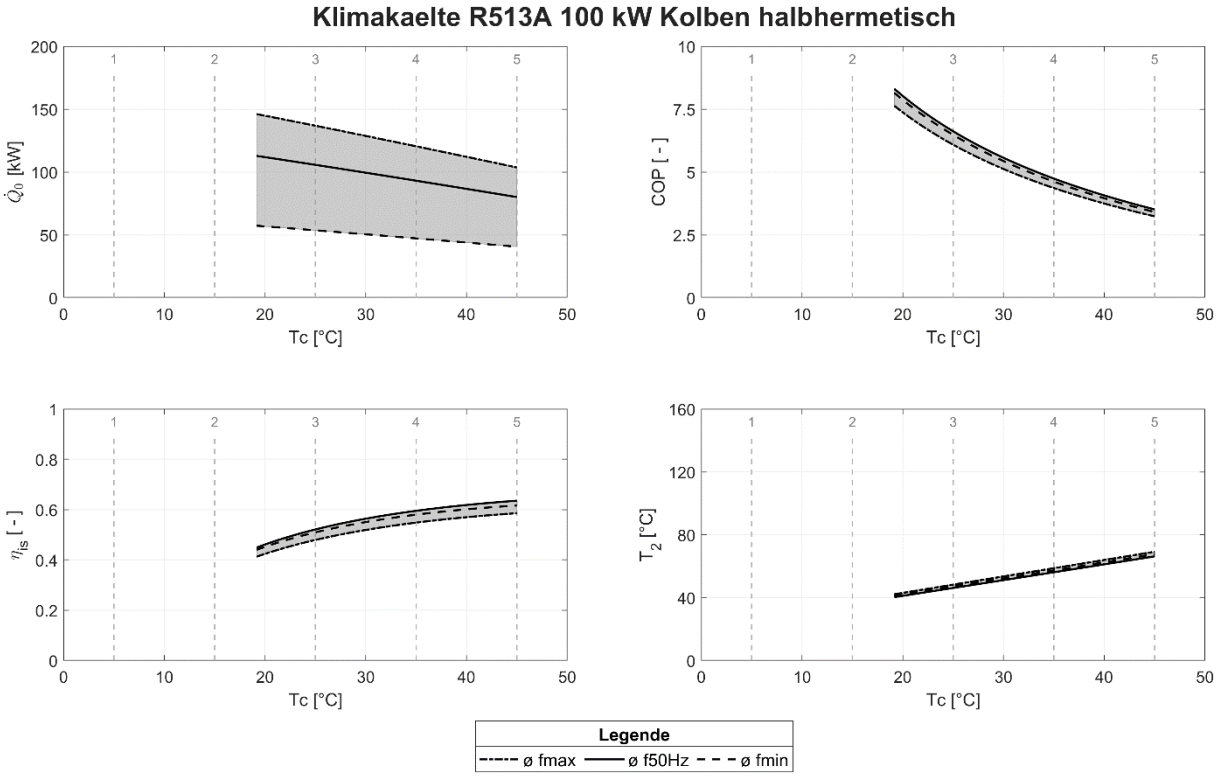

Klimakaelte R290 (Propan) 100 kW Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

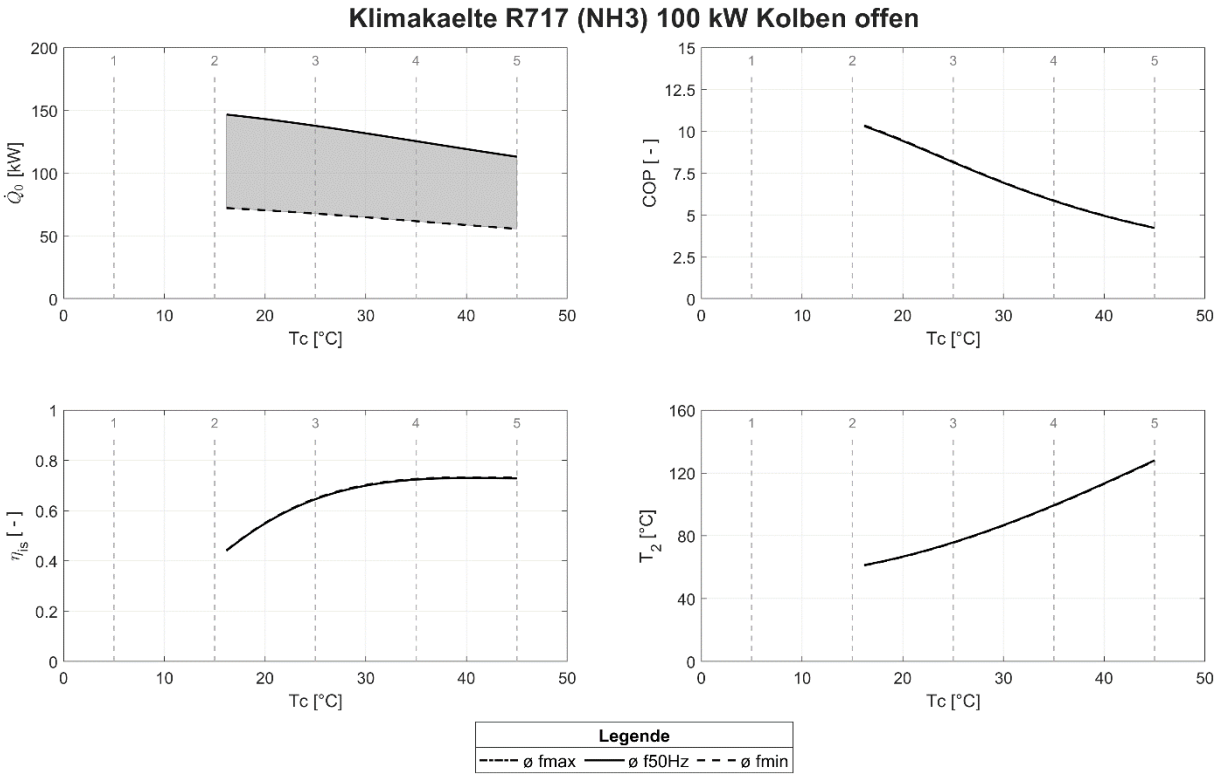

Klimakaelte R290 (Propan) 300 kW Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

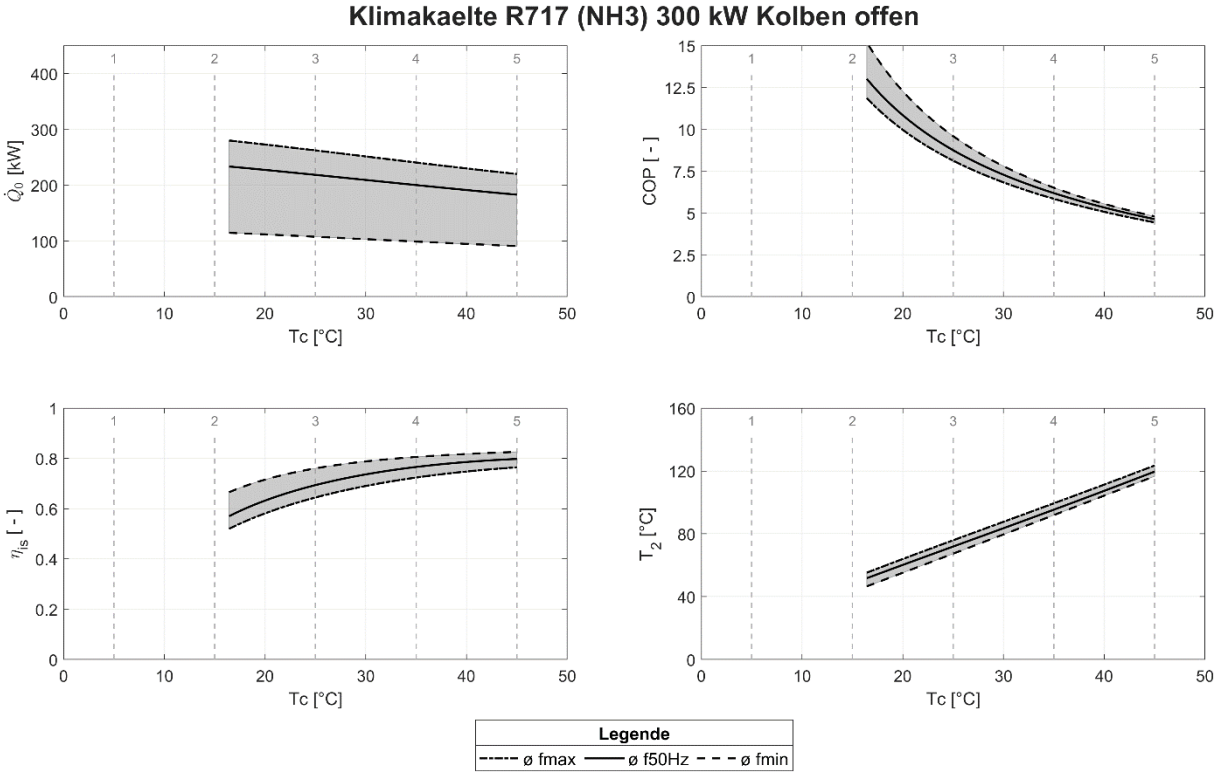

Klimakaelte R513A 20 kW Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

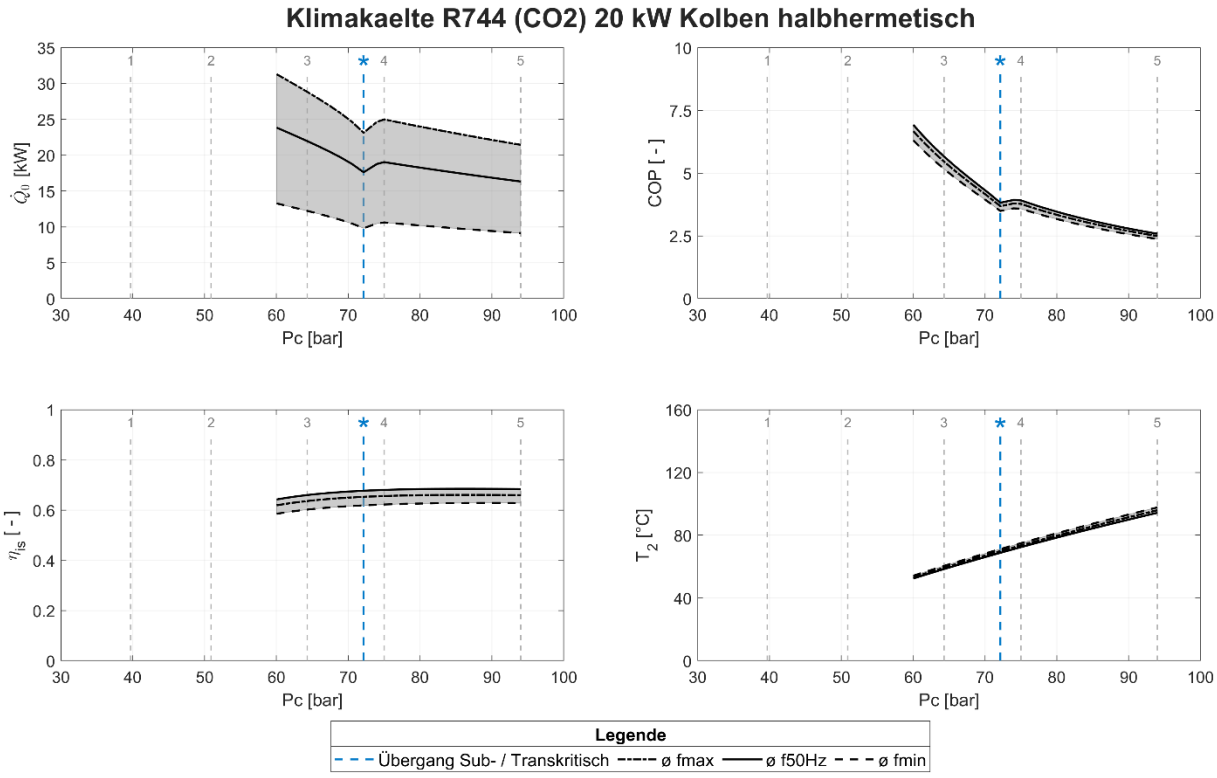

Klimakaelte R513A 20 kW Kolben hermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

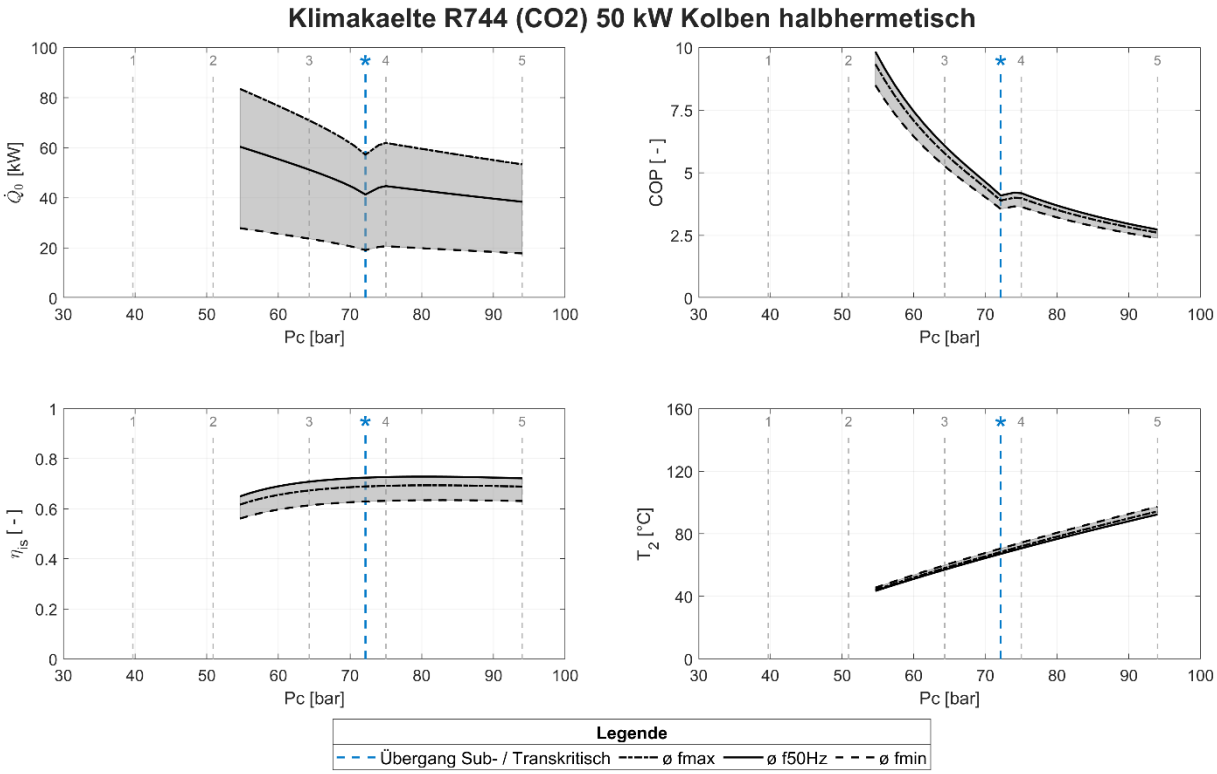

Klimakaelte R513A 50 kW Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

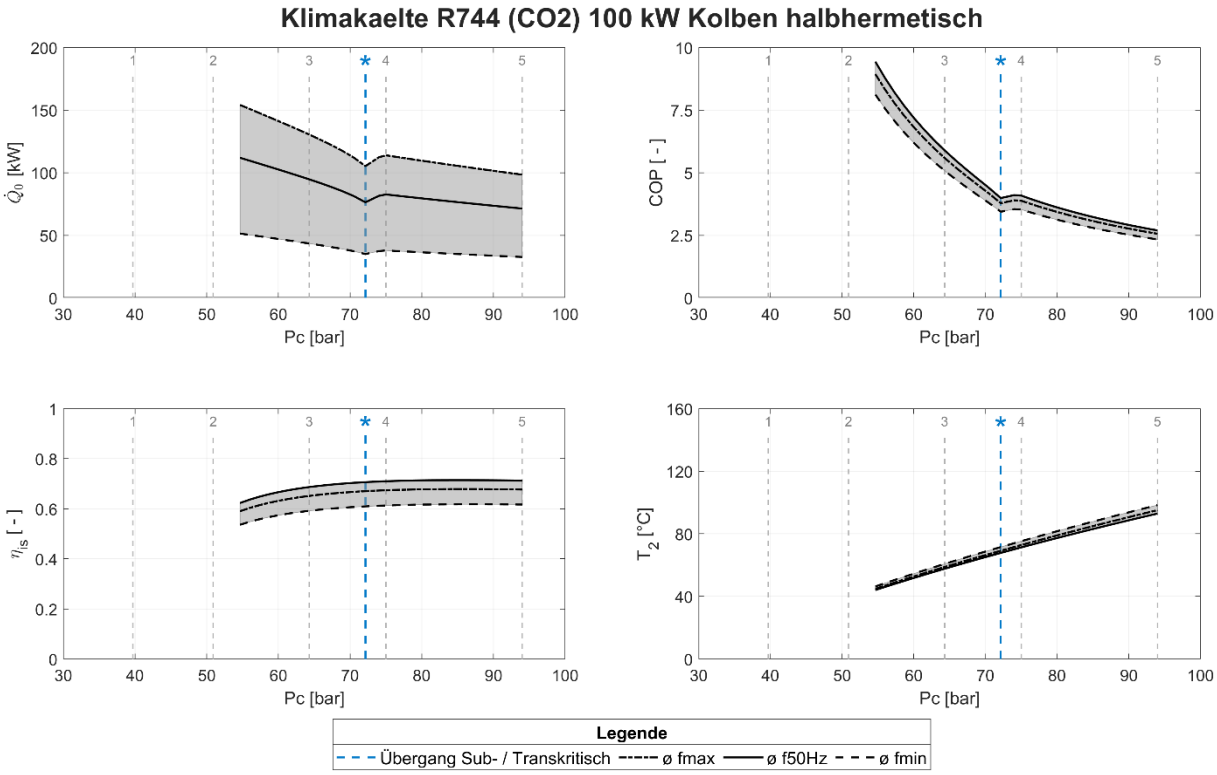

Klimakaelte R513A 100 kW Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

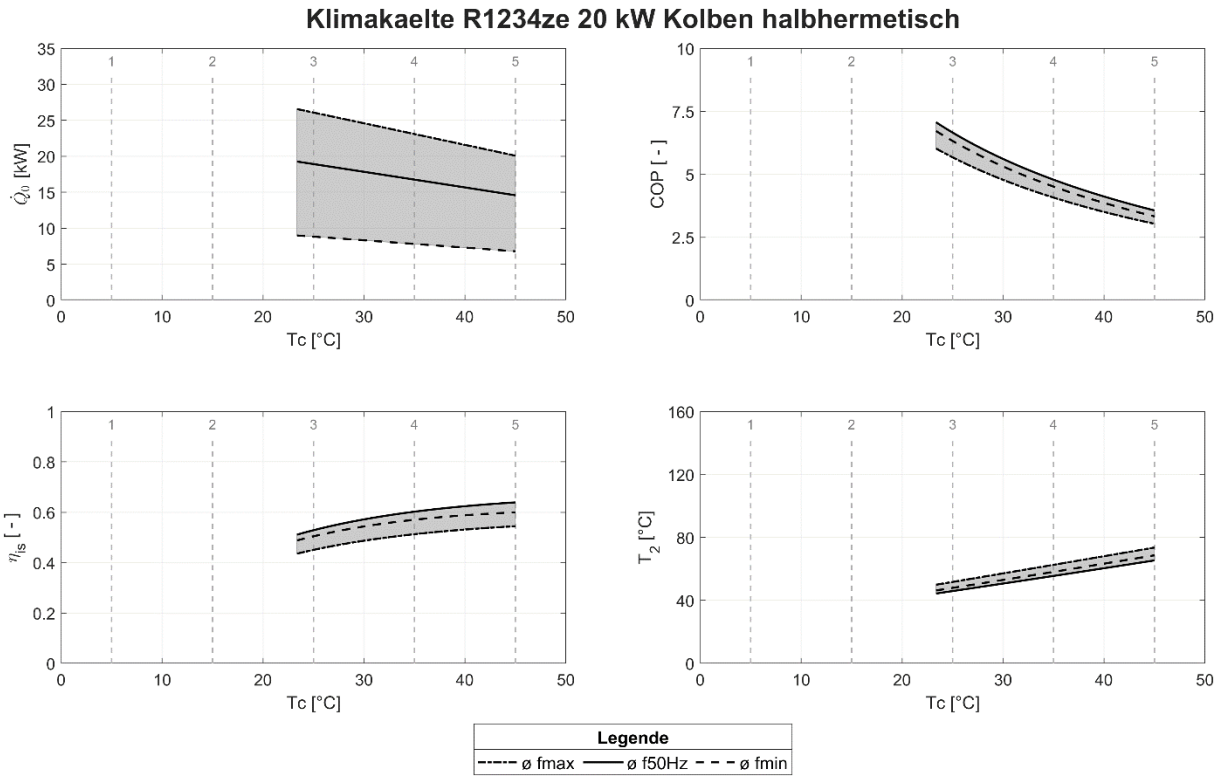

Klimakaelte R717 (NH3) 100 kW Kolben offen
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

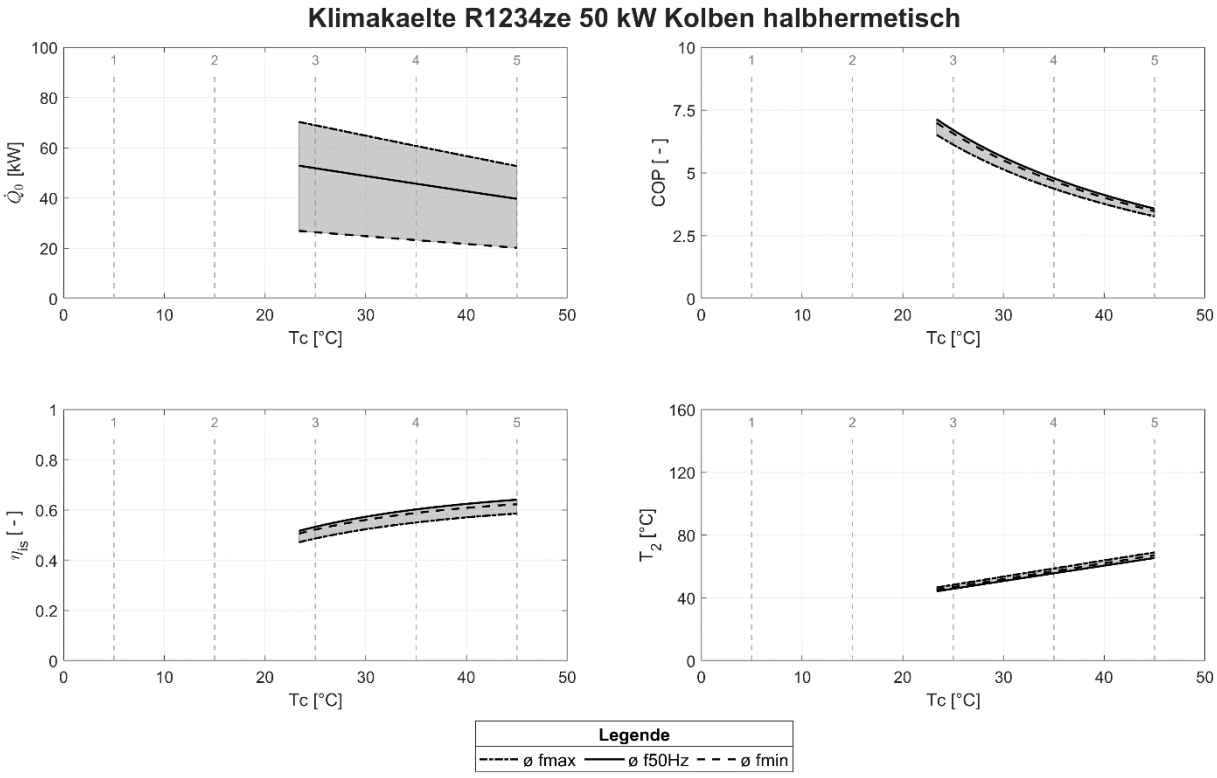

Klimakaelte R717 (NH3) 300 kW Kolben offen
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

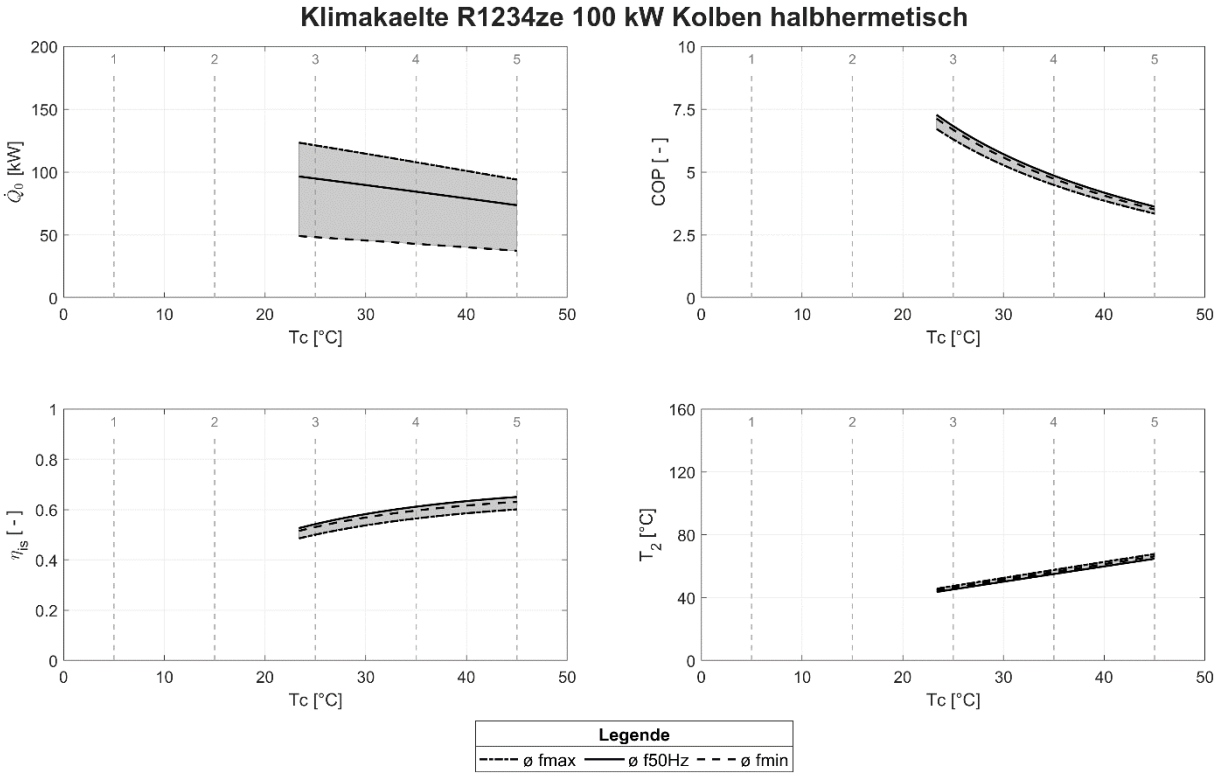

Klimakaelte R744 (CO2) 20 kW Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Pc [bar]
Legende
Übergang Sub- / Transkritisch
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin


Klimakaelte R744 (CO2) 50 kW Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Pc [bar]
Legende
Übergang Sub- / Transkritisch
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

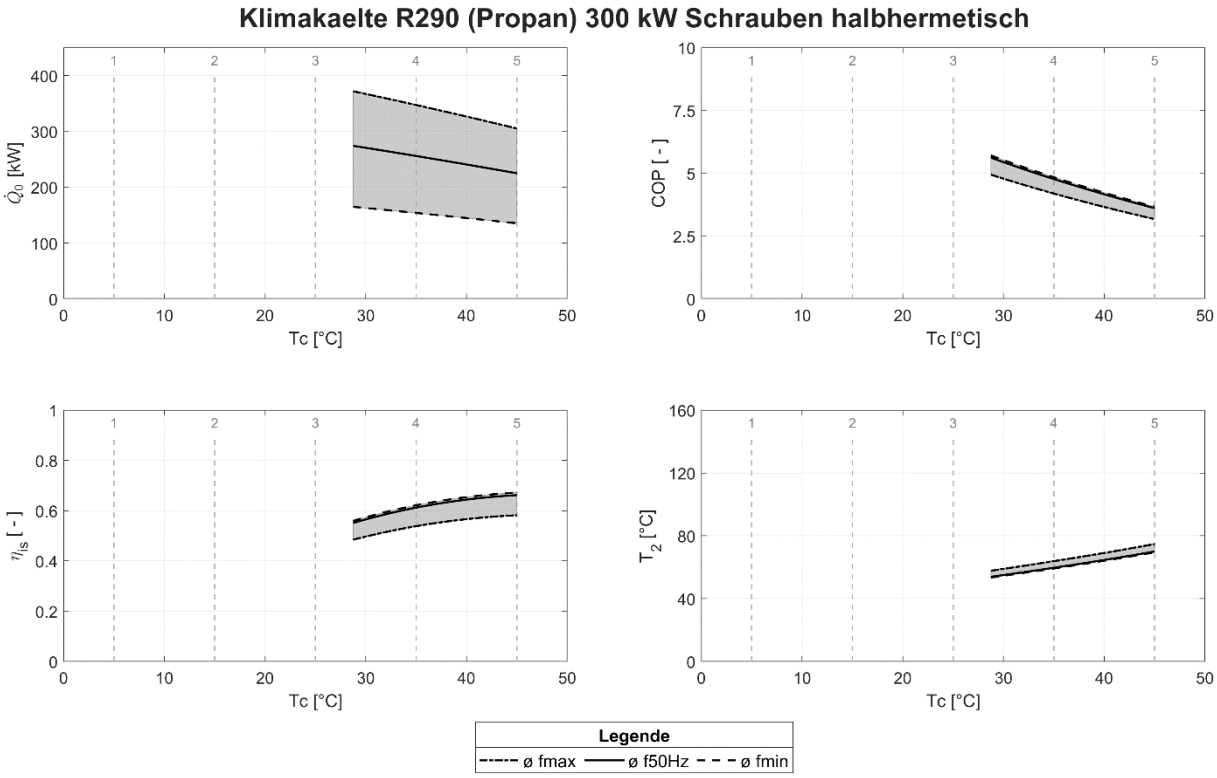

Klimakaelte R744 (CO2) 100 kW Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Pc [bar]
Legende
Übergang Sub- / Transkritisch
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

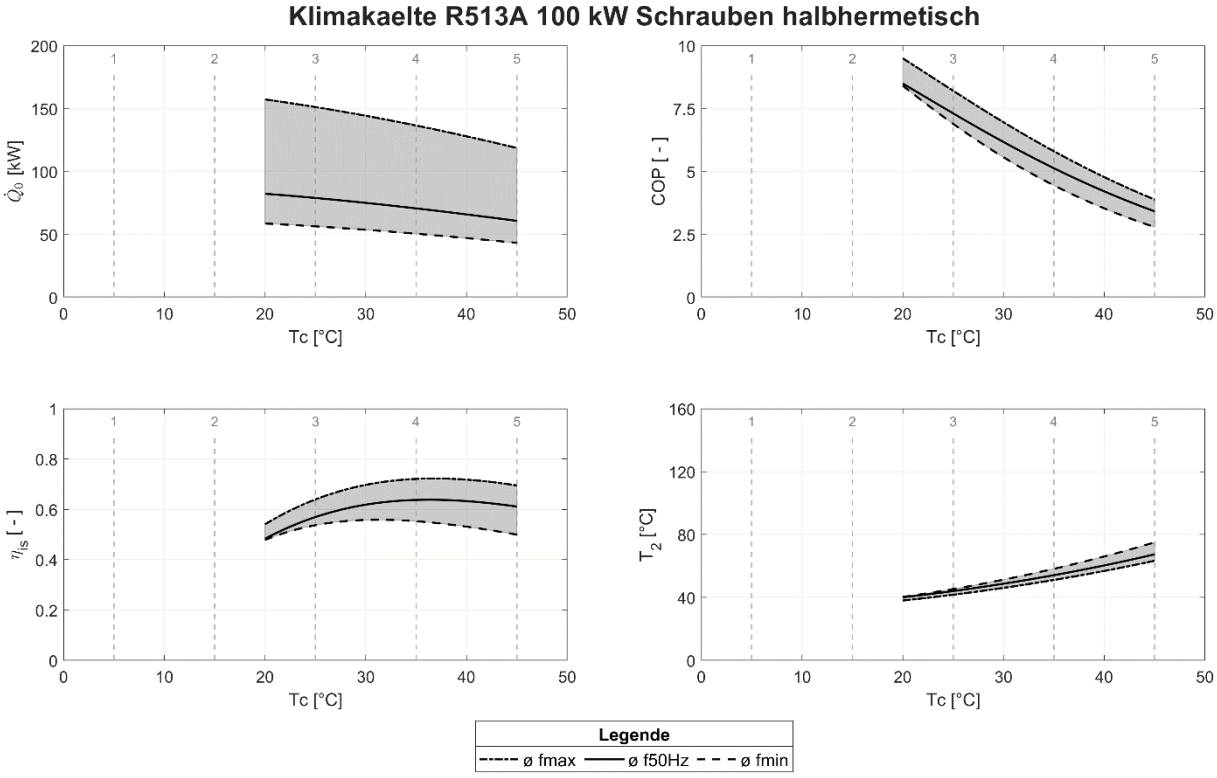

Klimakaelte R1234ze 20 kW Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

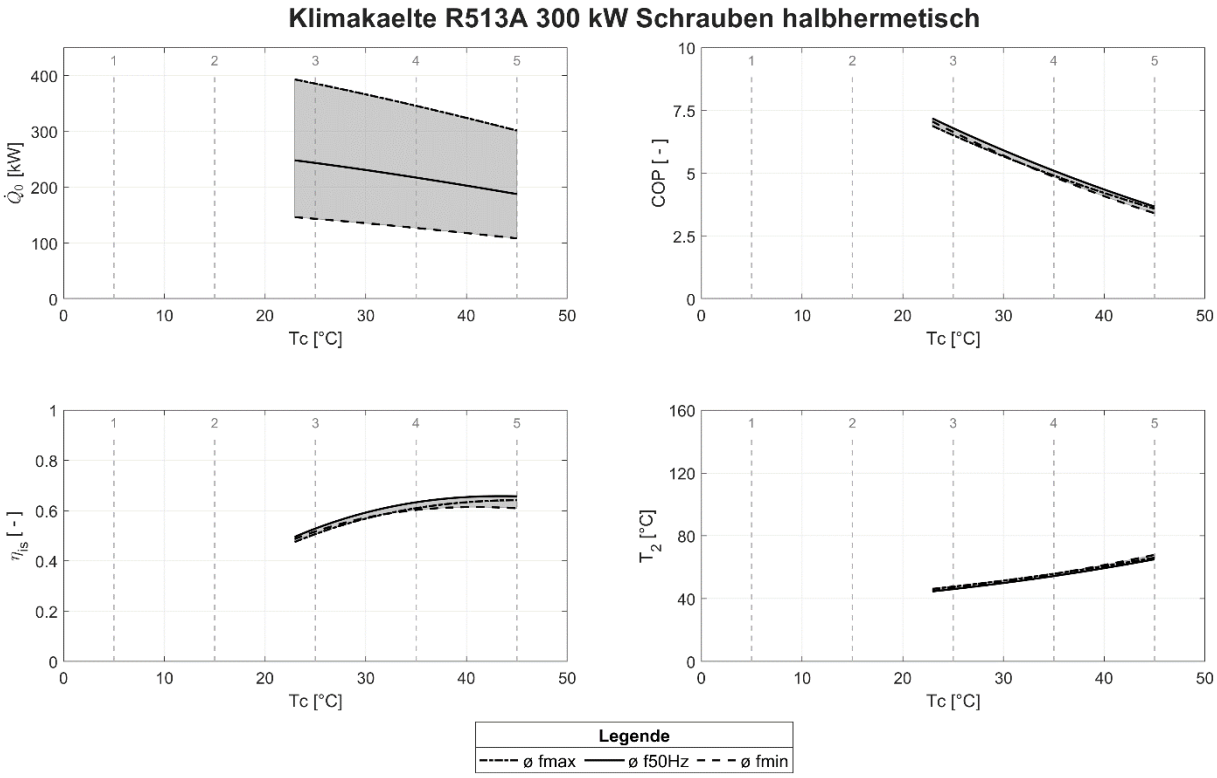

Klimakaelte R1234ze 50 kW Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

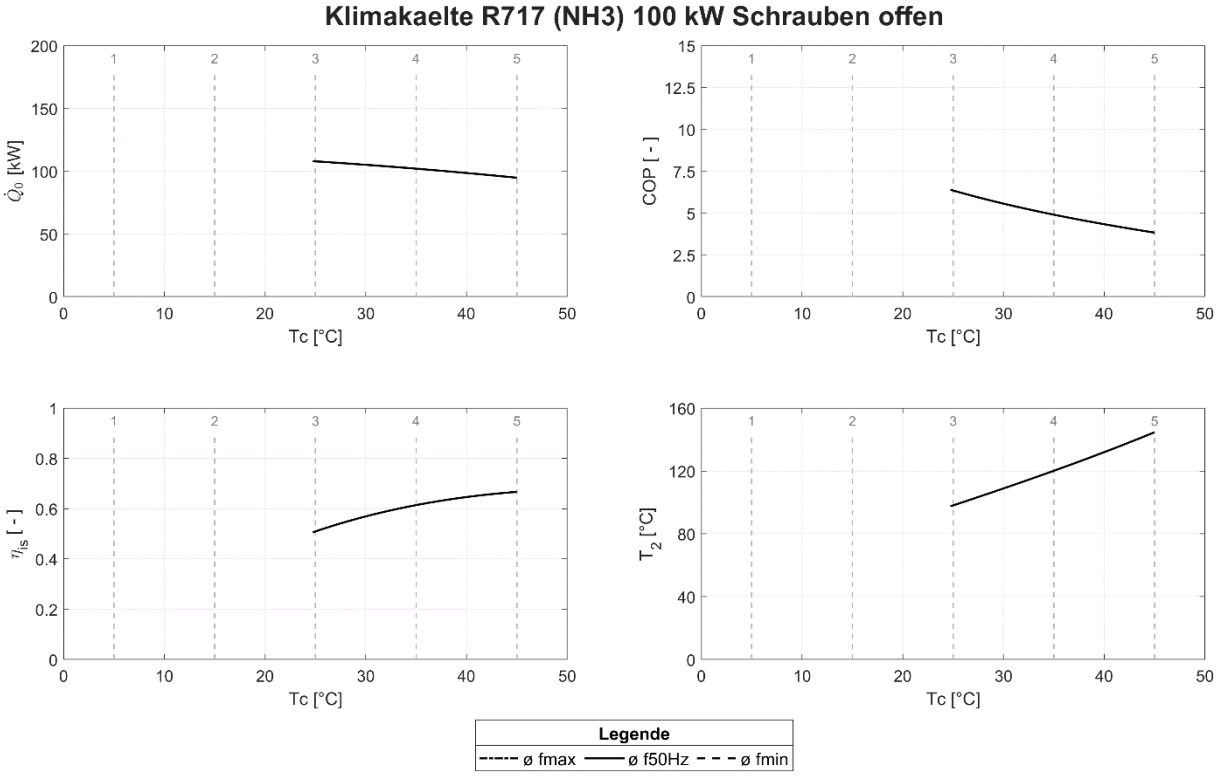

Klimakaelte R1234ze 100 kW Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

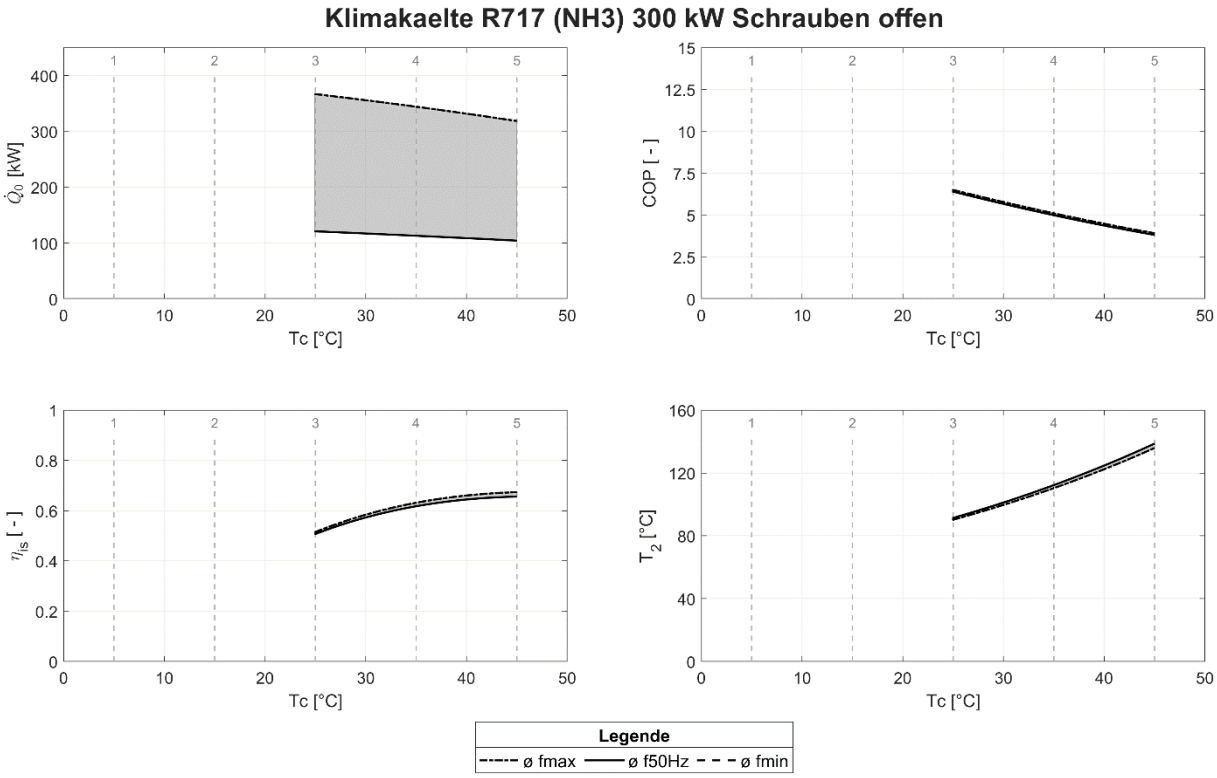
D.1.4 Schrauben Klimakälte

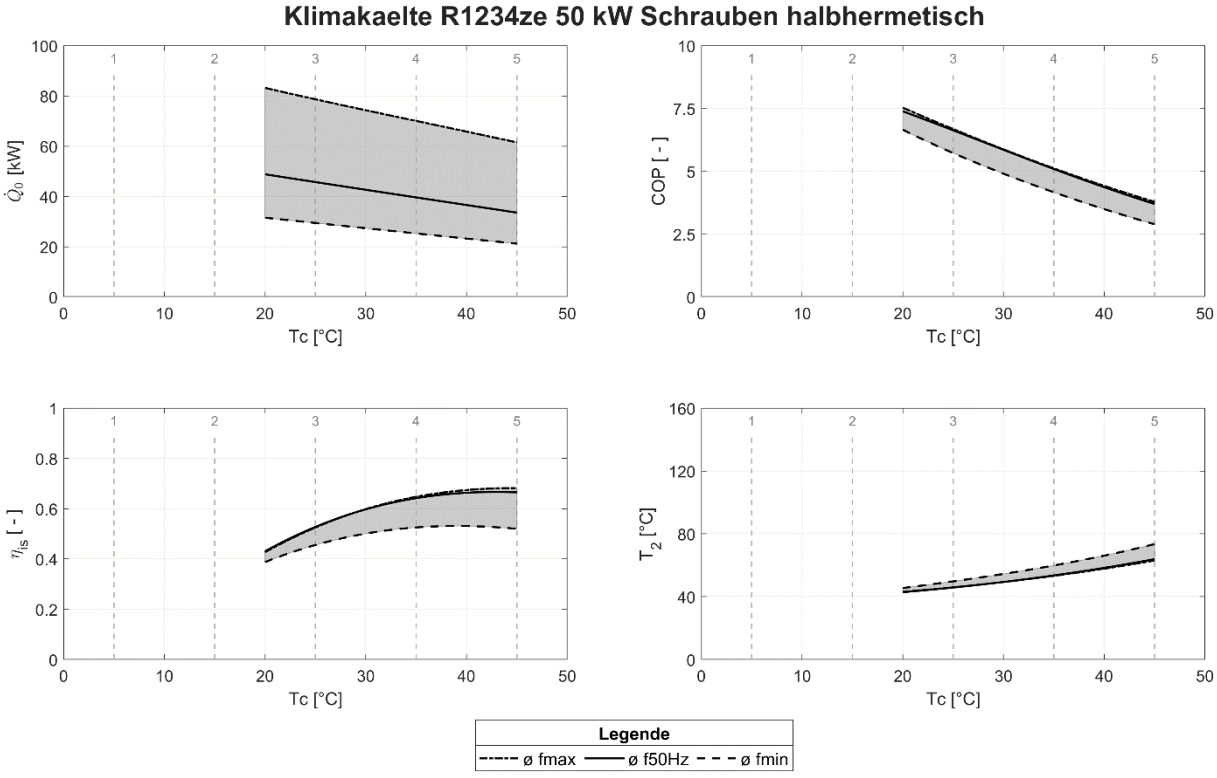


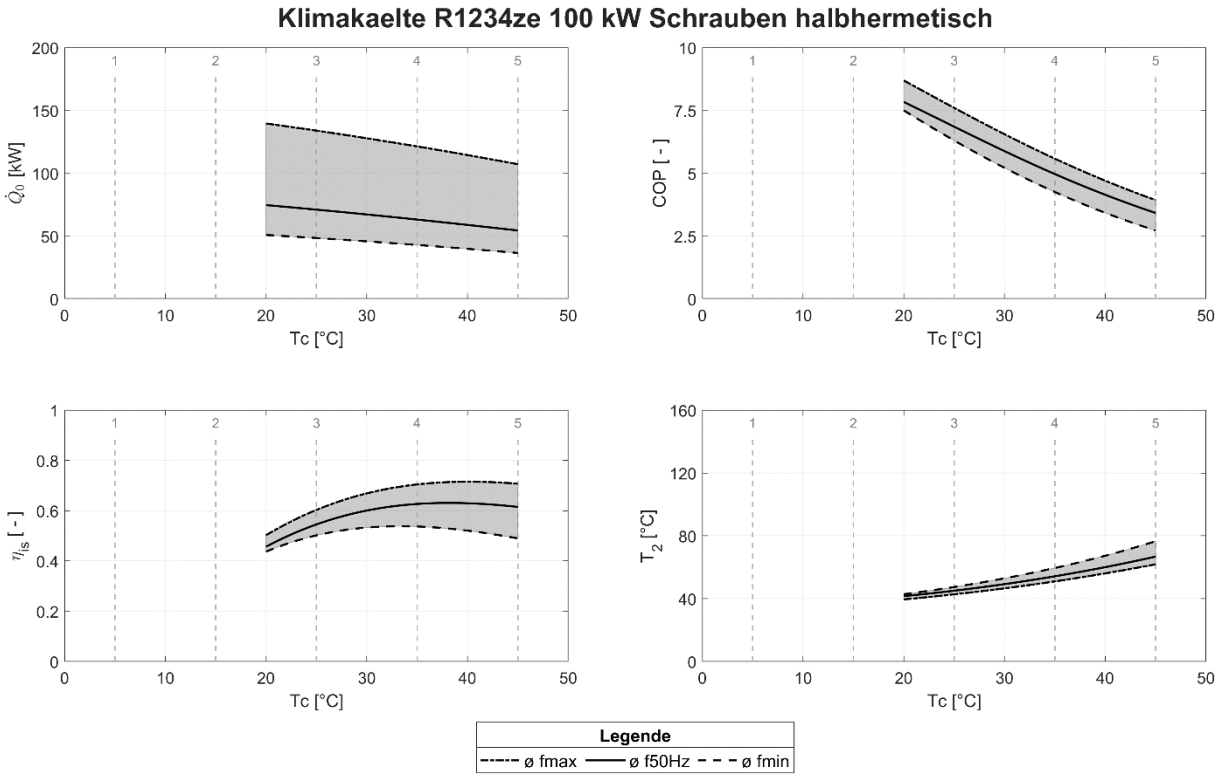


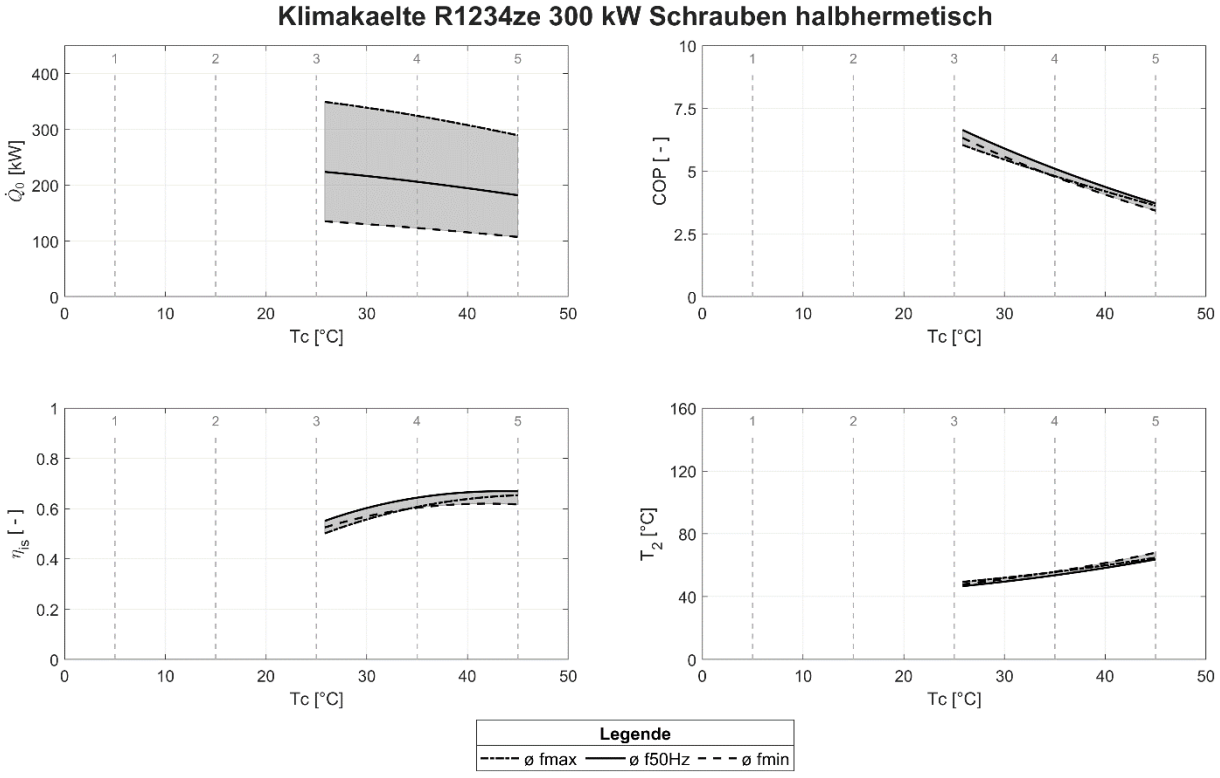

Klimakaelte R513A 300 kW Schrauben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin


Klimakaelte R717 (NH3) 100 kW Schrauben offen
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

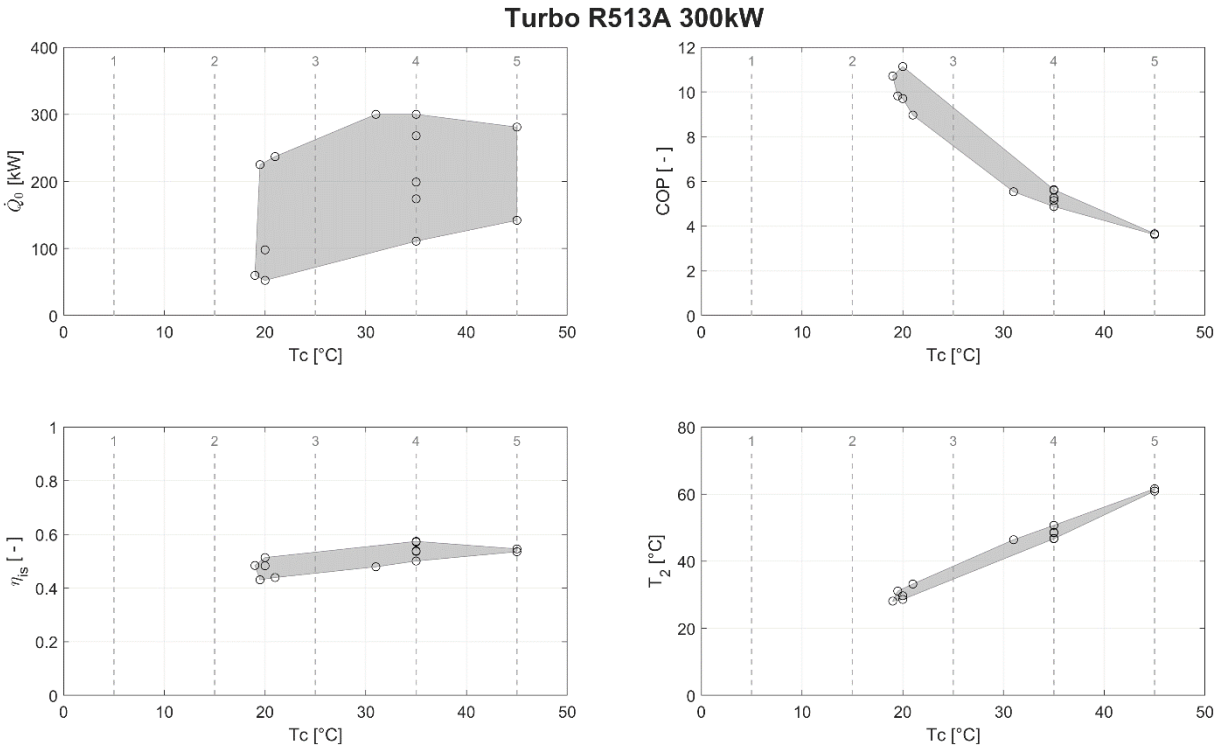

Klimakaelte R717 (NH3) 300 kW Schrauben offen
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

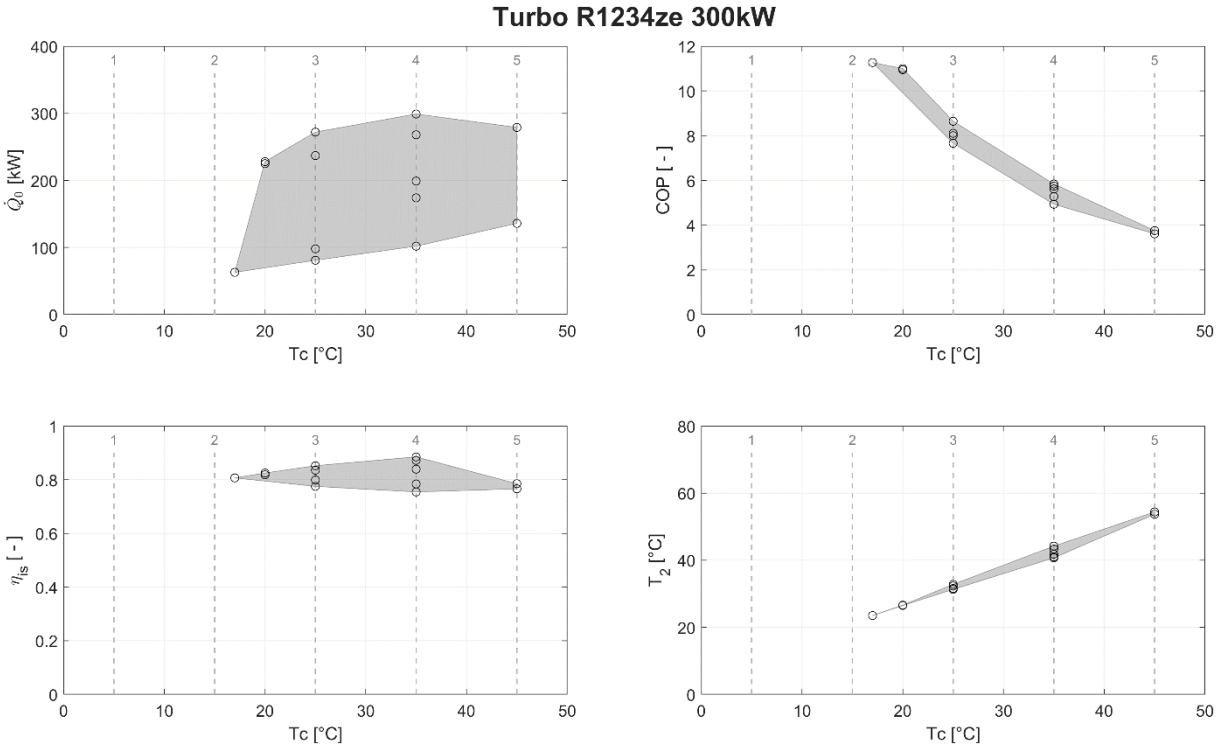

Klimakaelte R1234ze 50 kW Schrauben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin


Klimakaelte R1234ze 100 kW Schrauben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin


Klimakaelte R1234ze 300 kW Schrauben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

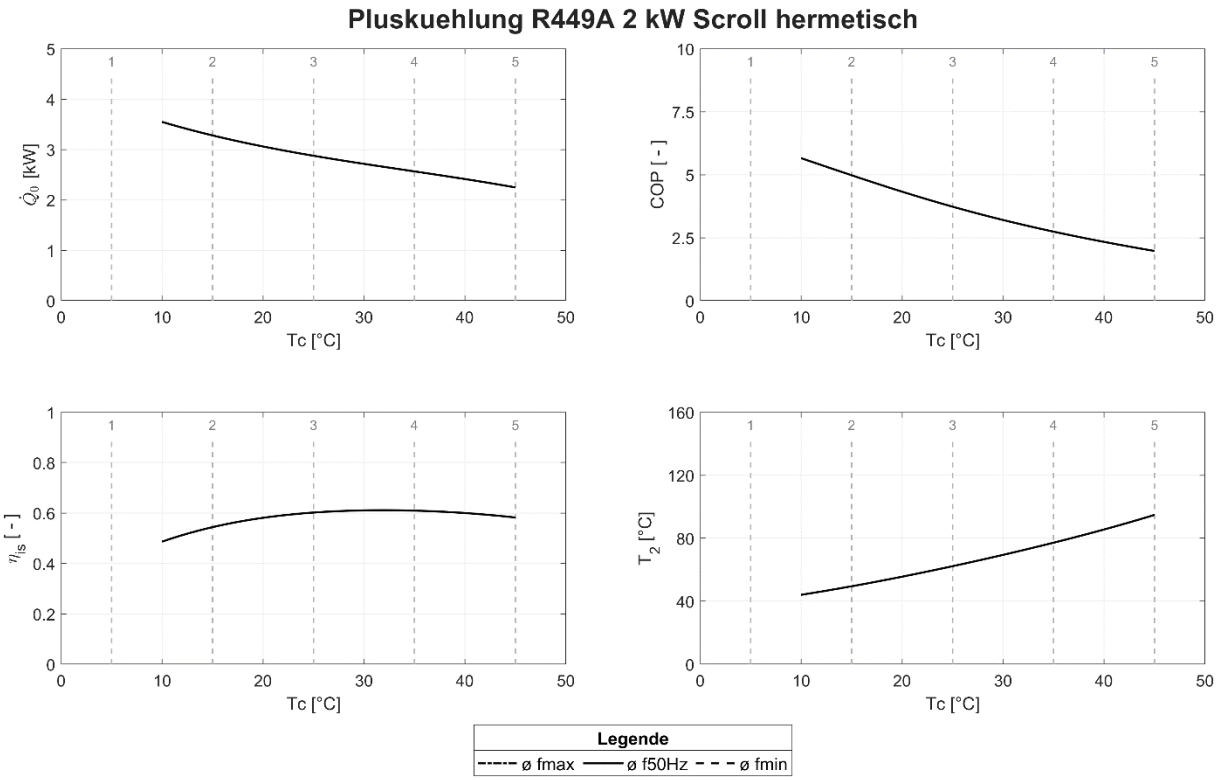
D.1.5 Turbo Klimakälte

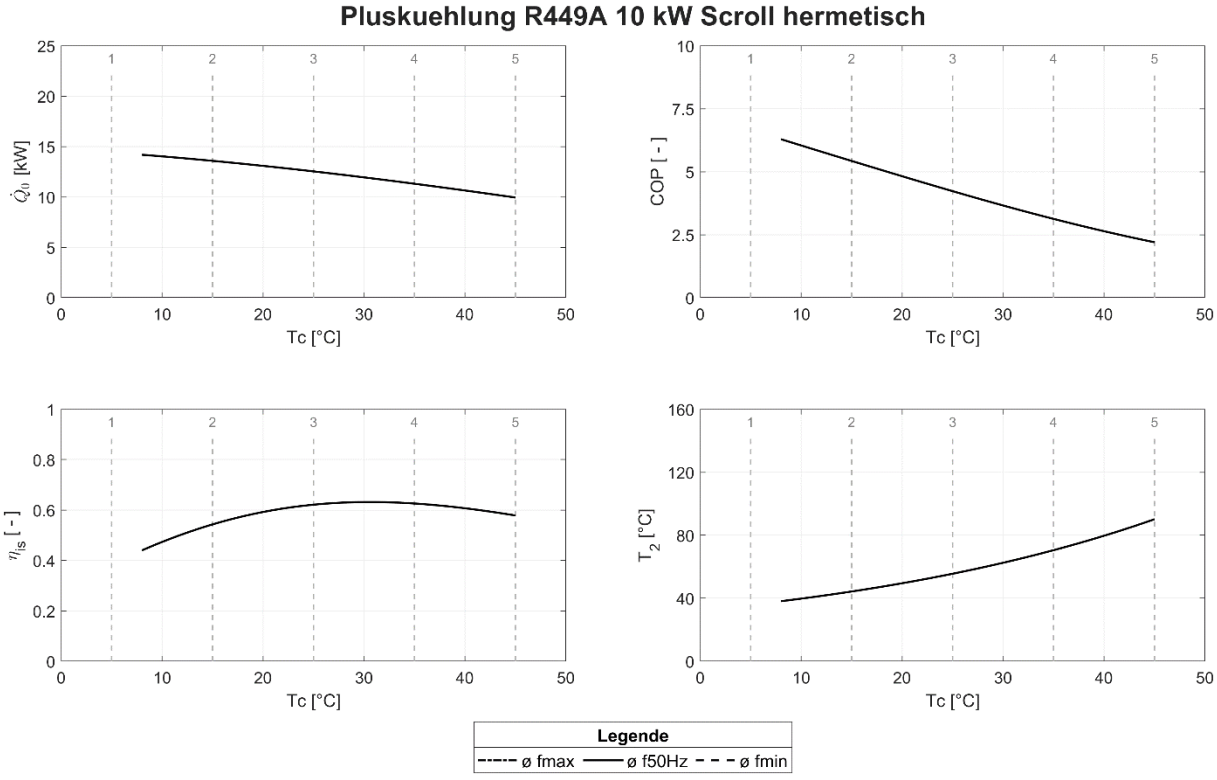


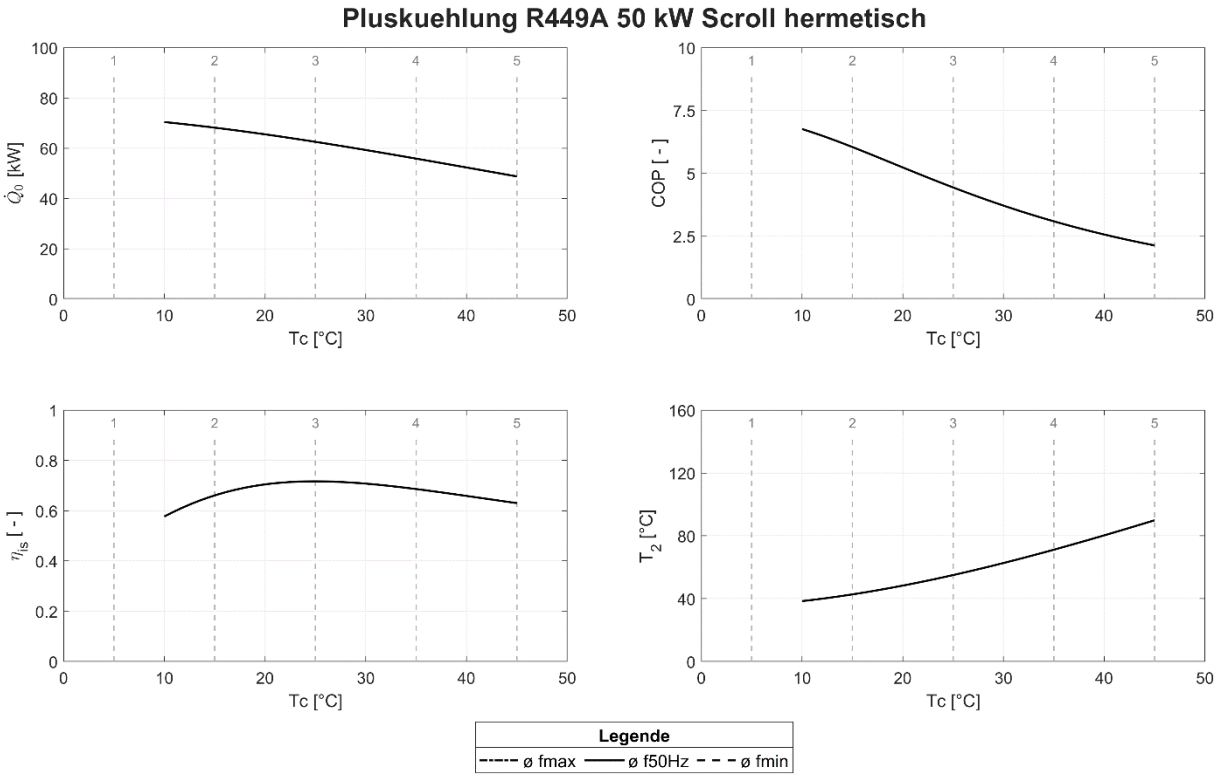


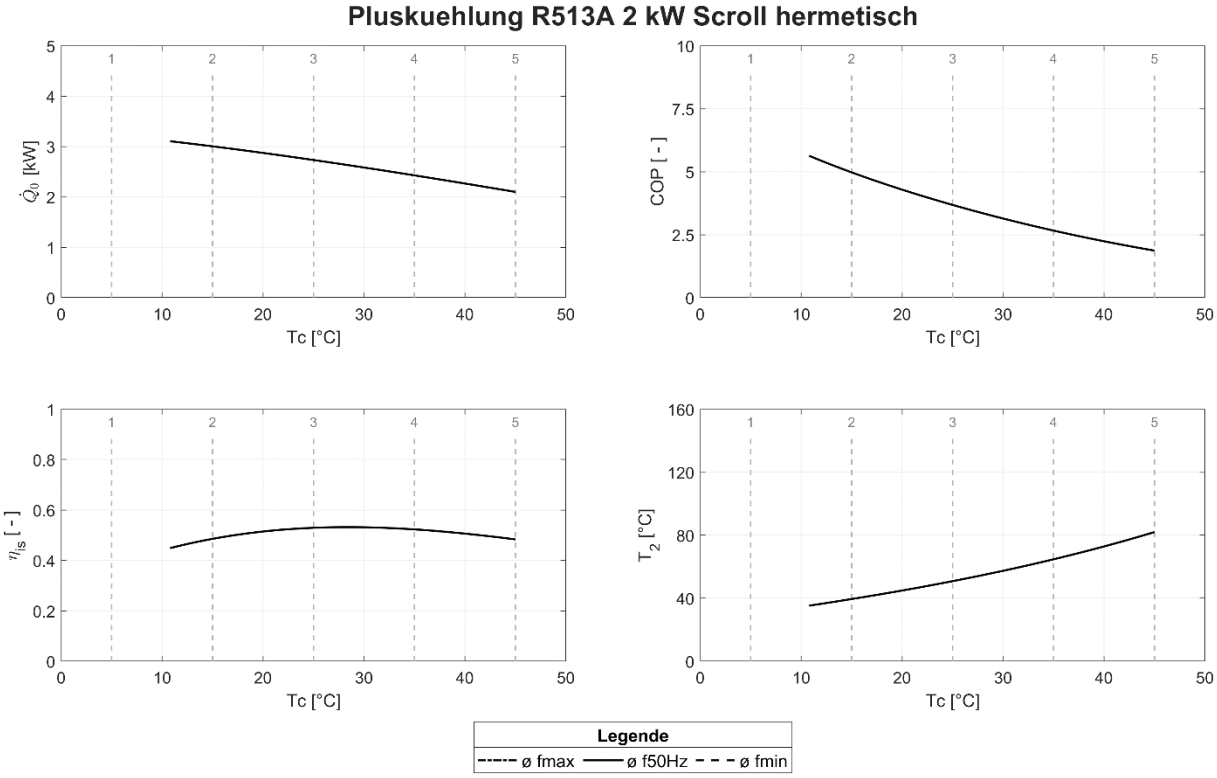
D.2 Verdichter-Kennfelder Pluskühlung

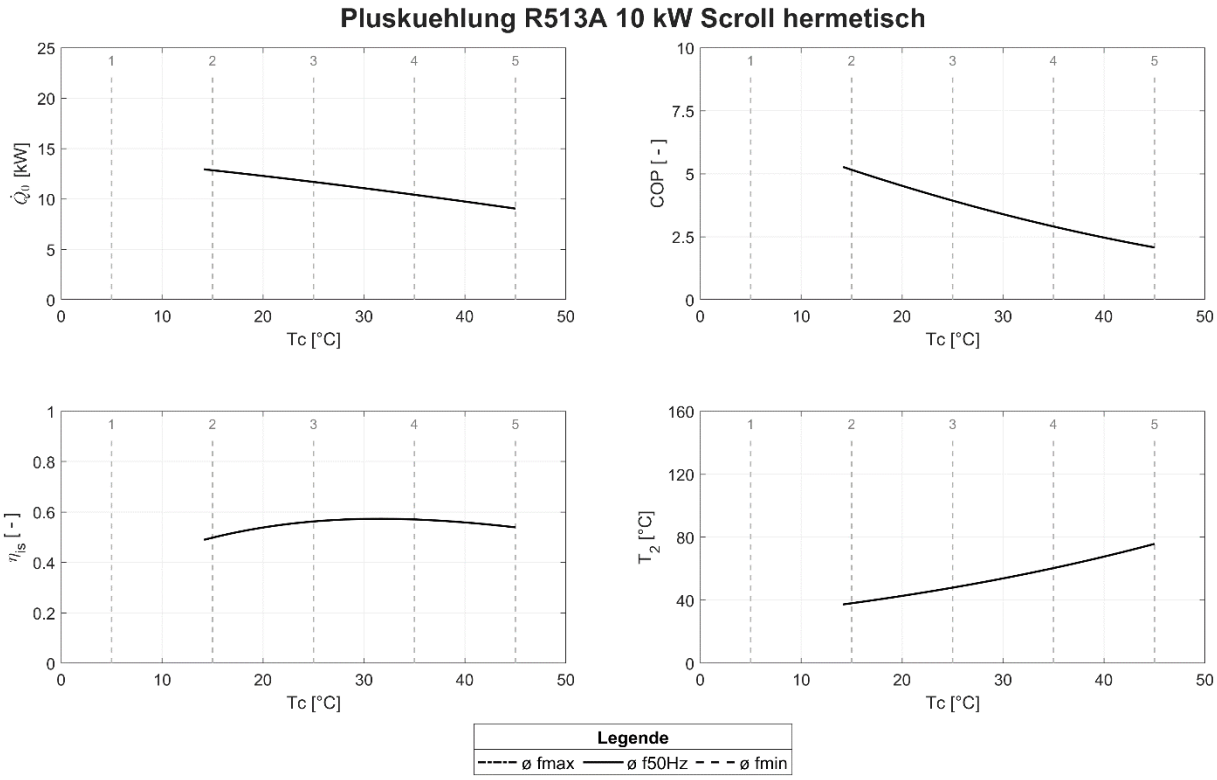
D.2.1 Scroll Pluskühlung



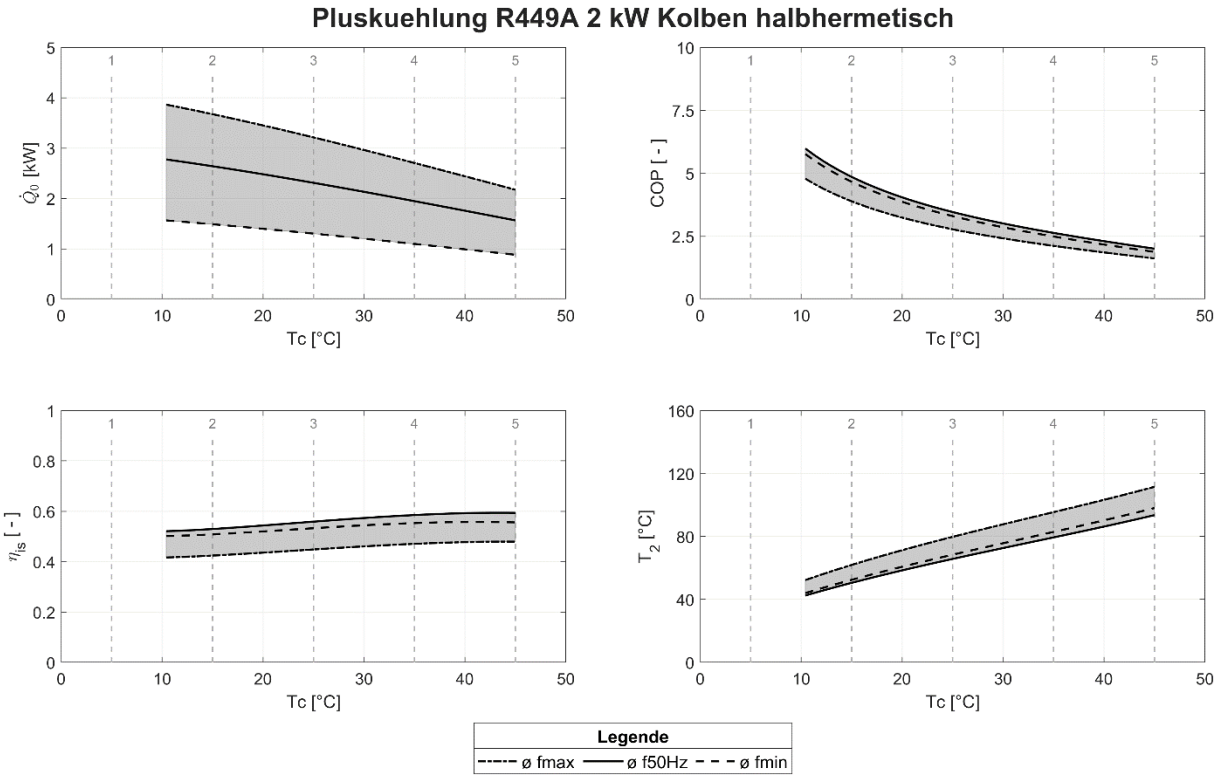


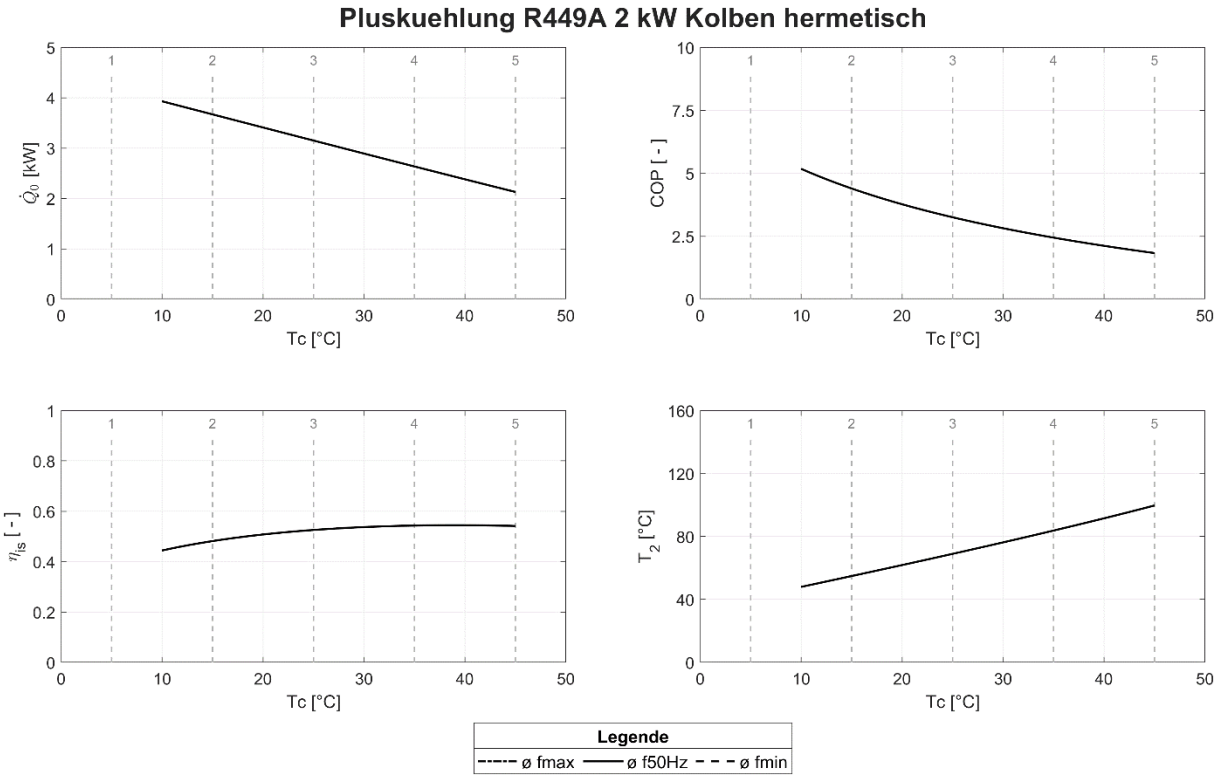

Pluskuehlung R449A 50 kW Scroll hermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

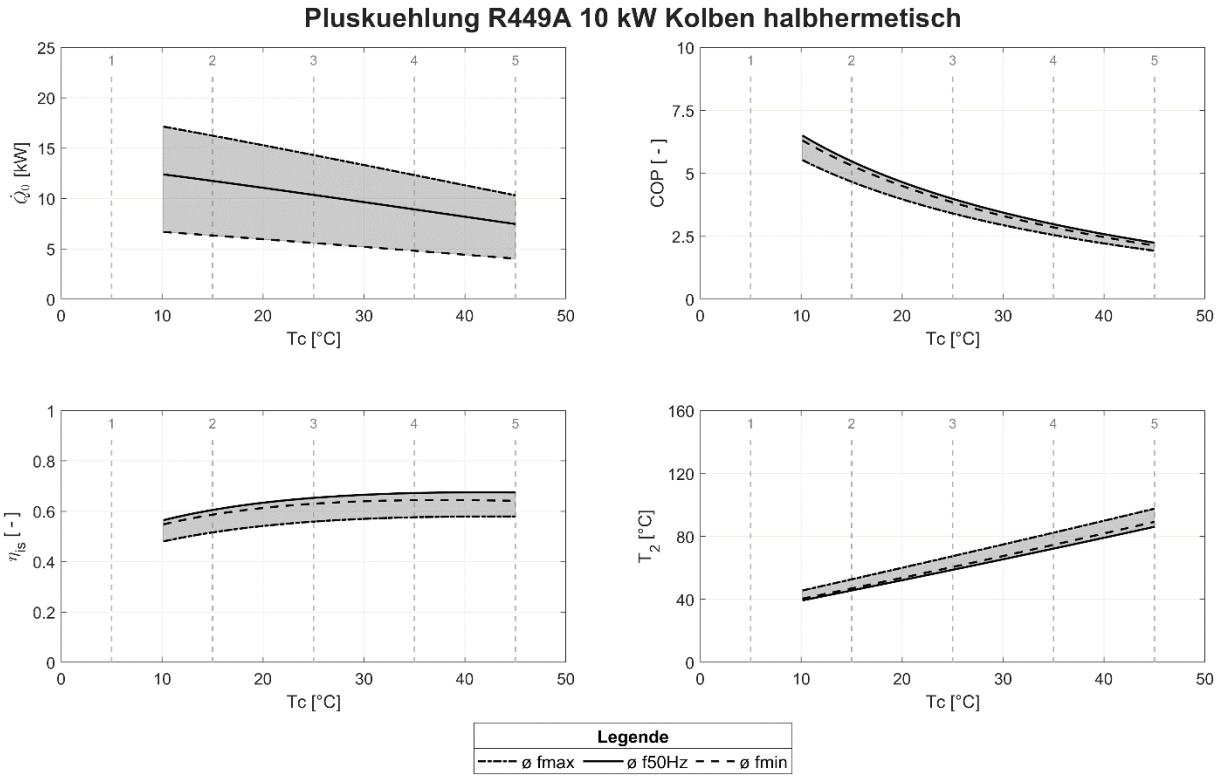

Pluskuehlung R513A 2 kW Scroll hermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

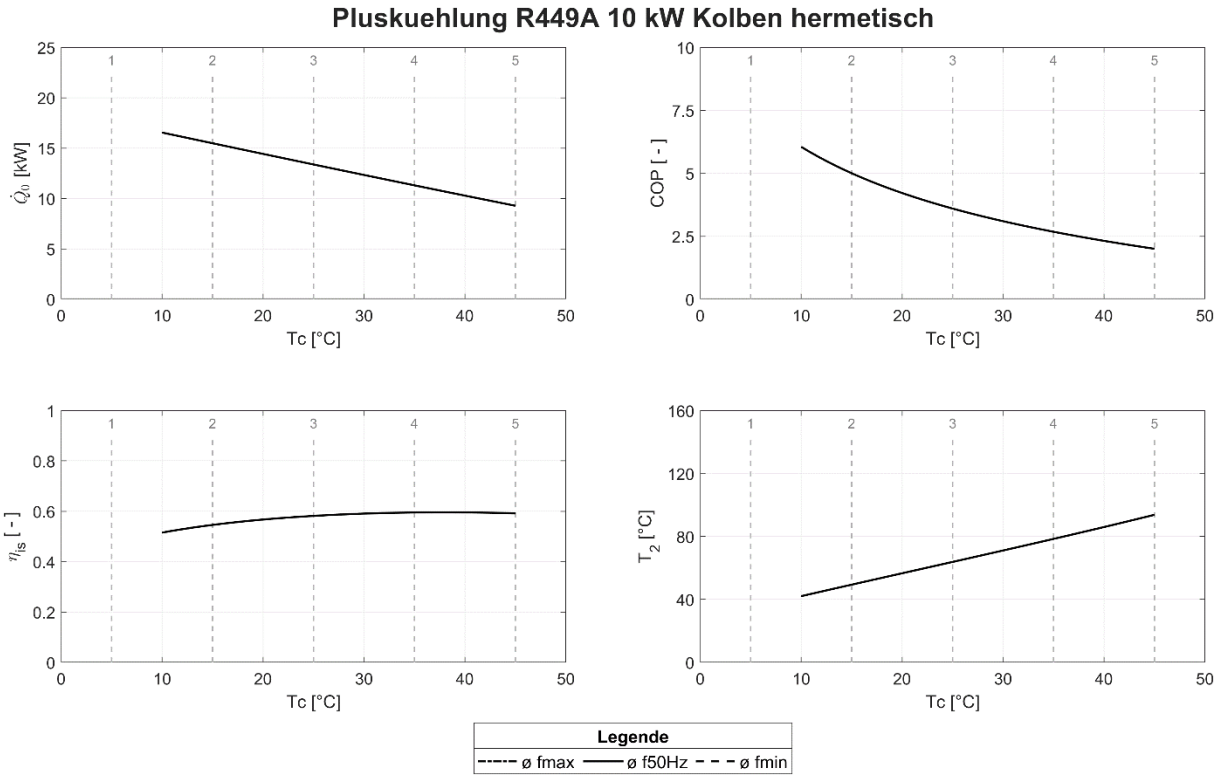


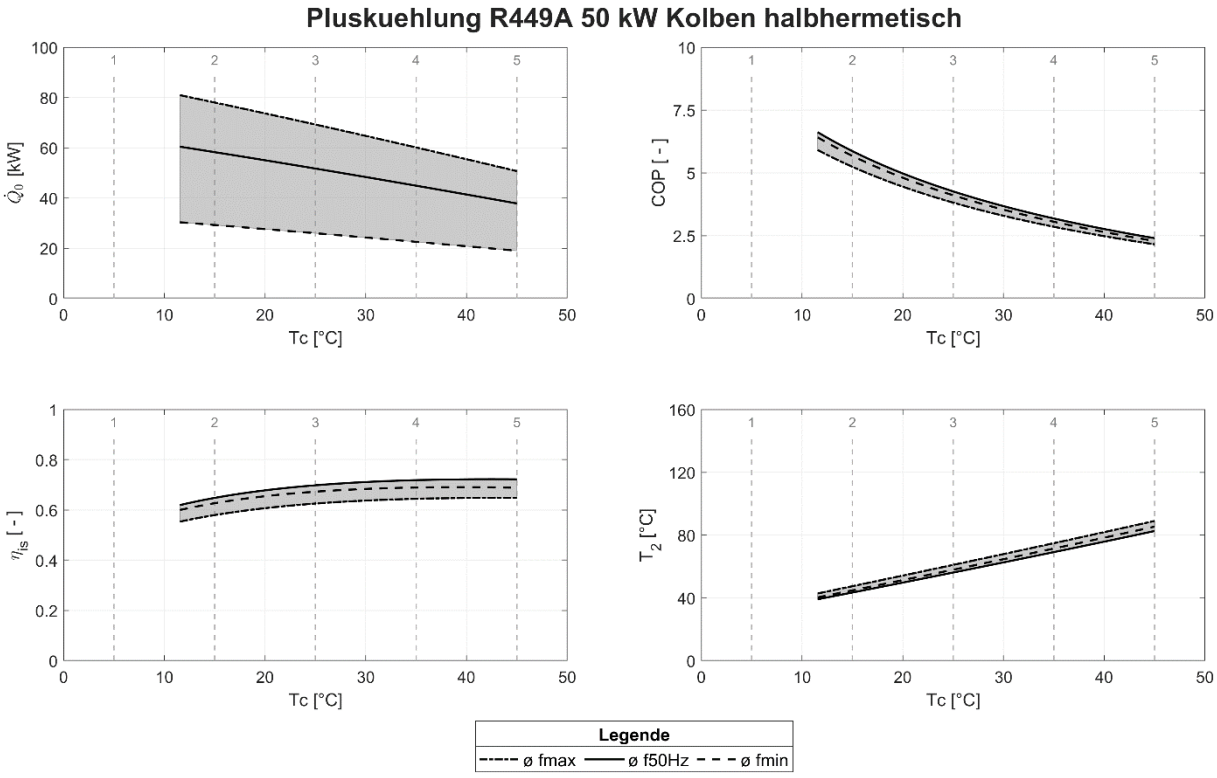
D.2.2 Hubkolben Pluskühlung

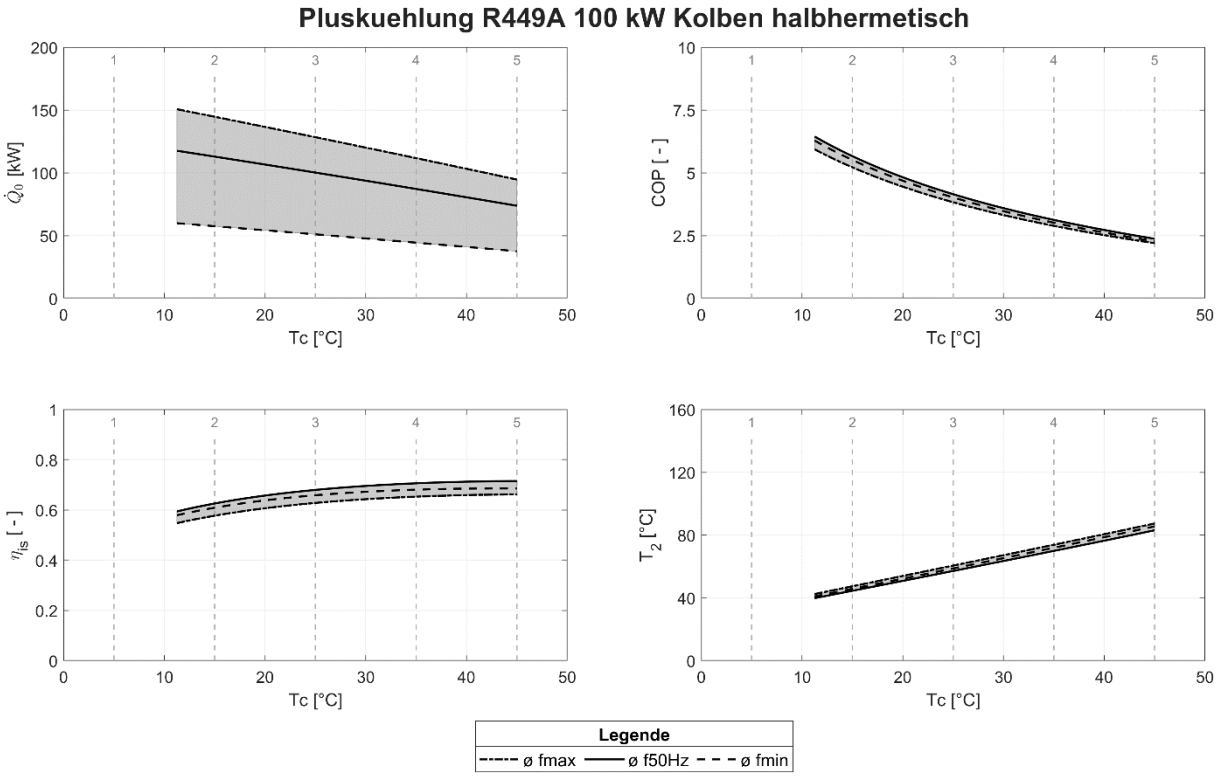


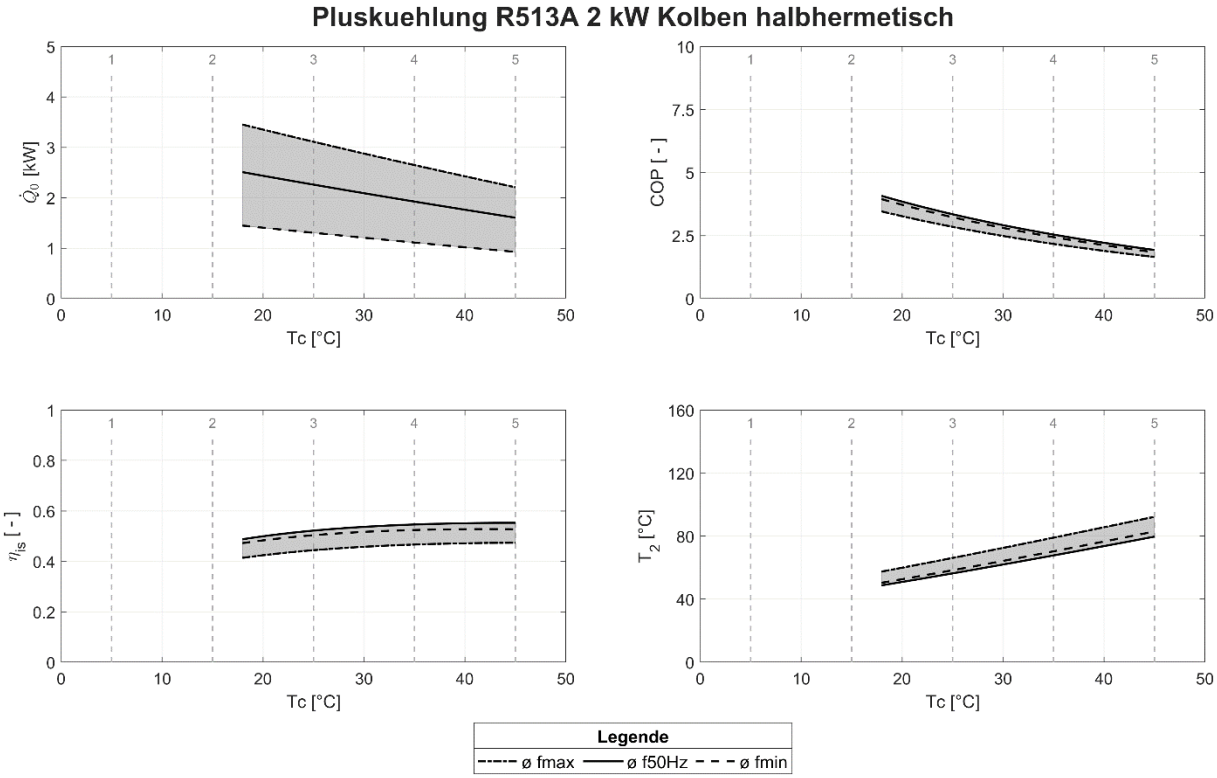

Pluskuehlung R449A 2 kW Kolben hermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

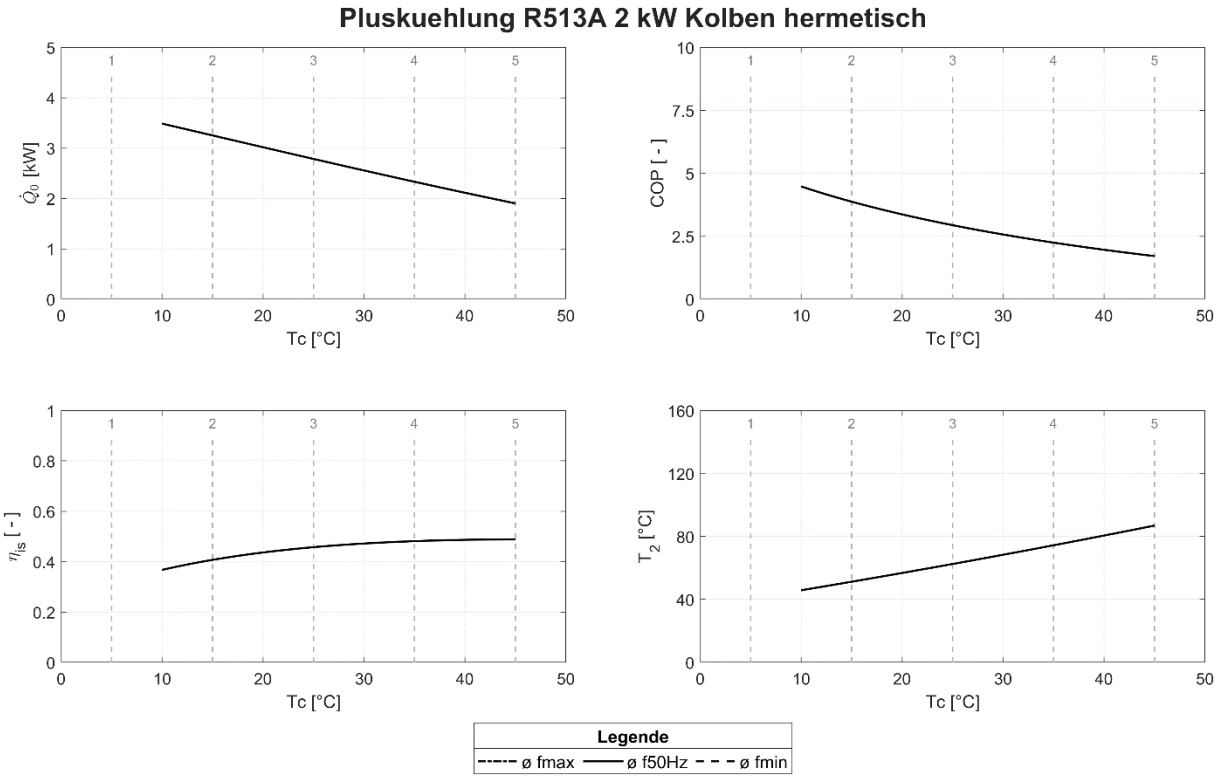

Pluskuehlung R449A 10 kW Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

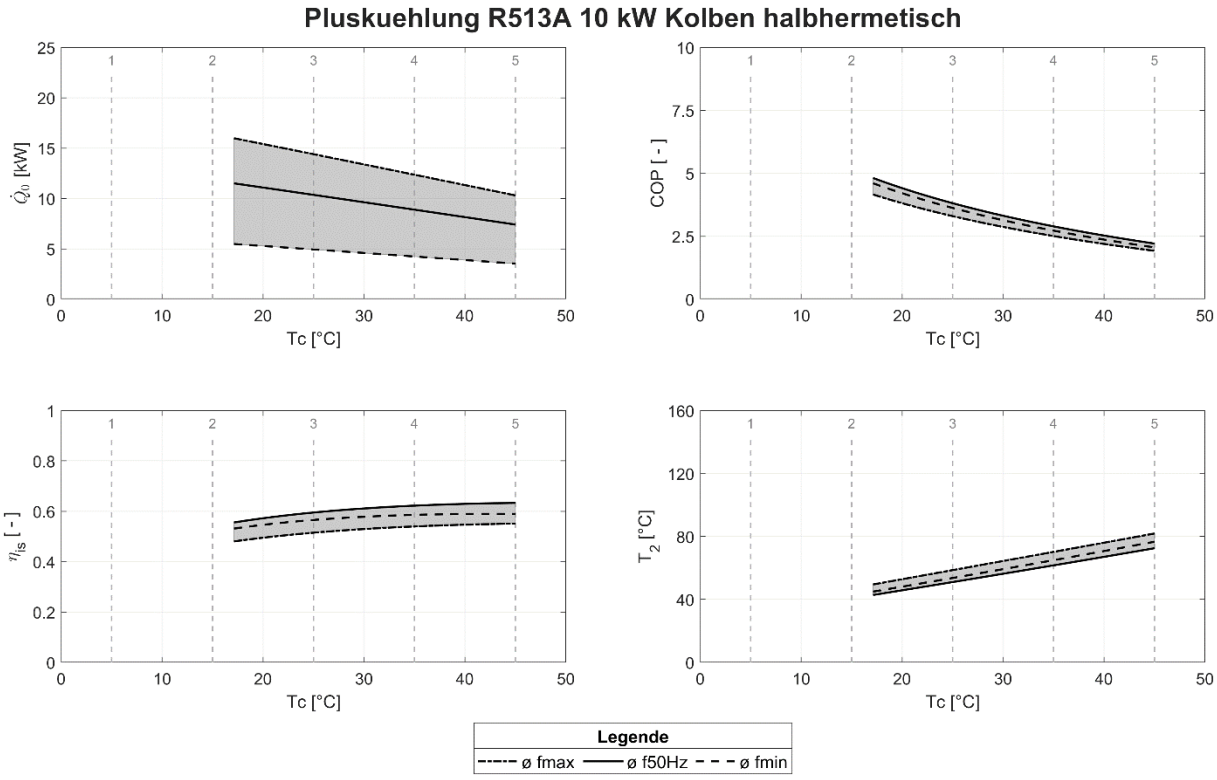

Pluskuehlung R449A 10 kW Kolben hermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

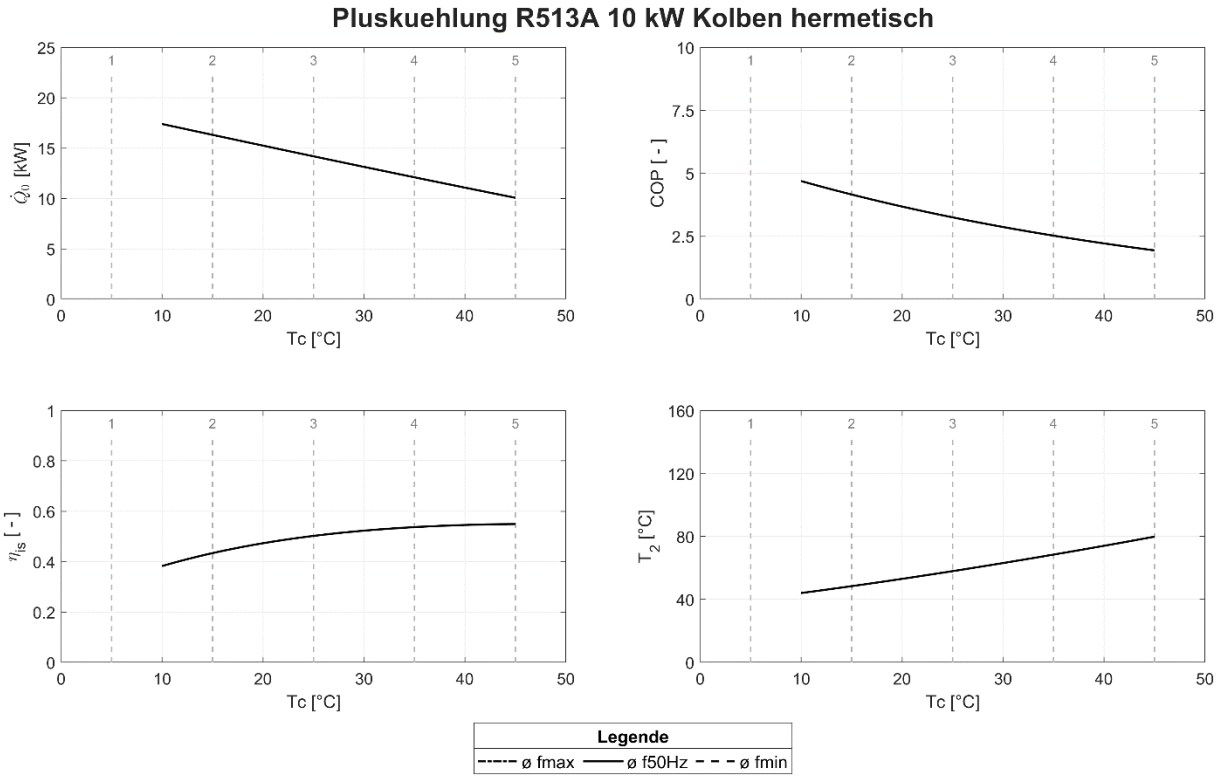

Pluskuehlung R449A 50 kW Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

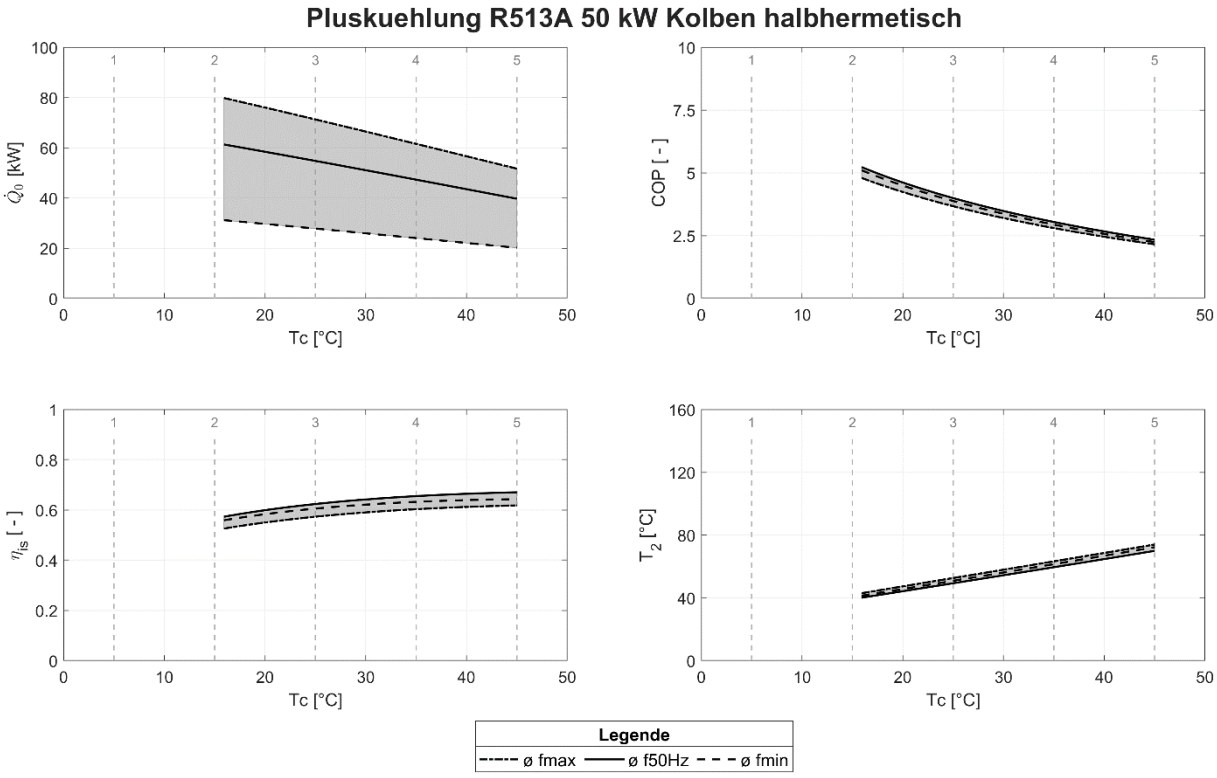

Pluskuehlung R449A 100 kW Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

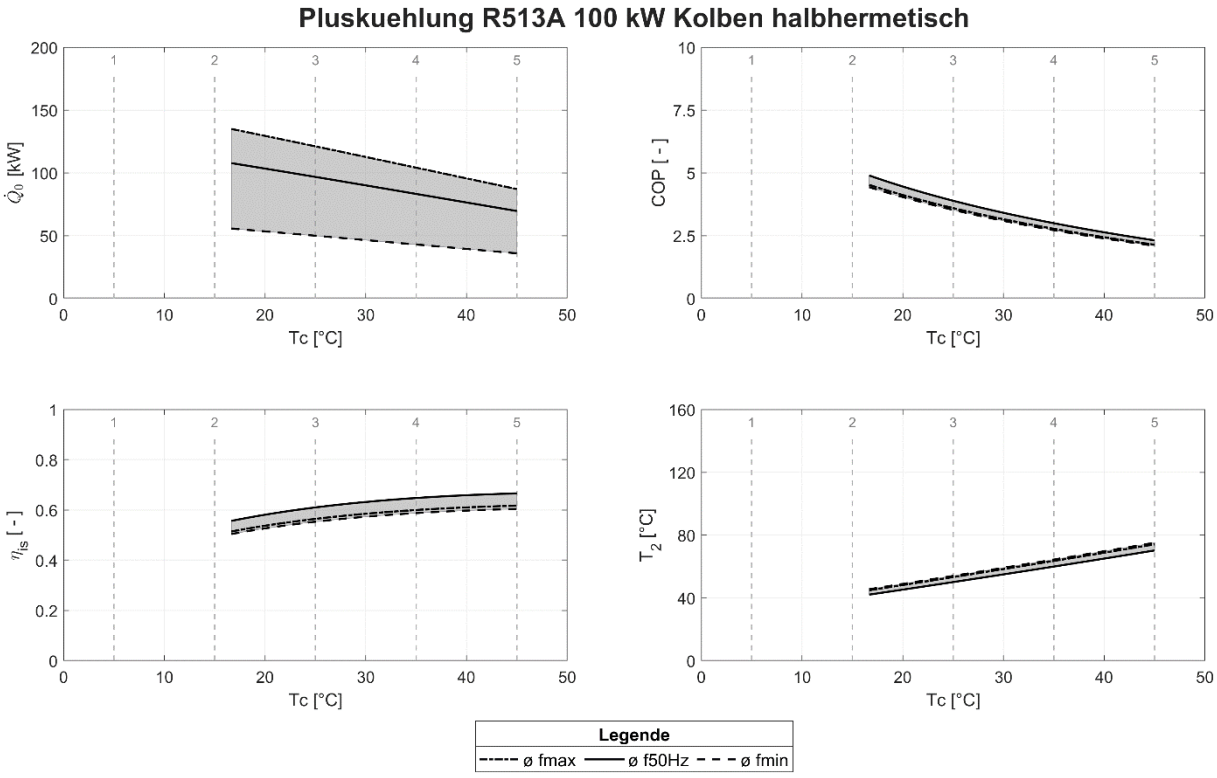

Pluskuehlung R513A 2 kW Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

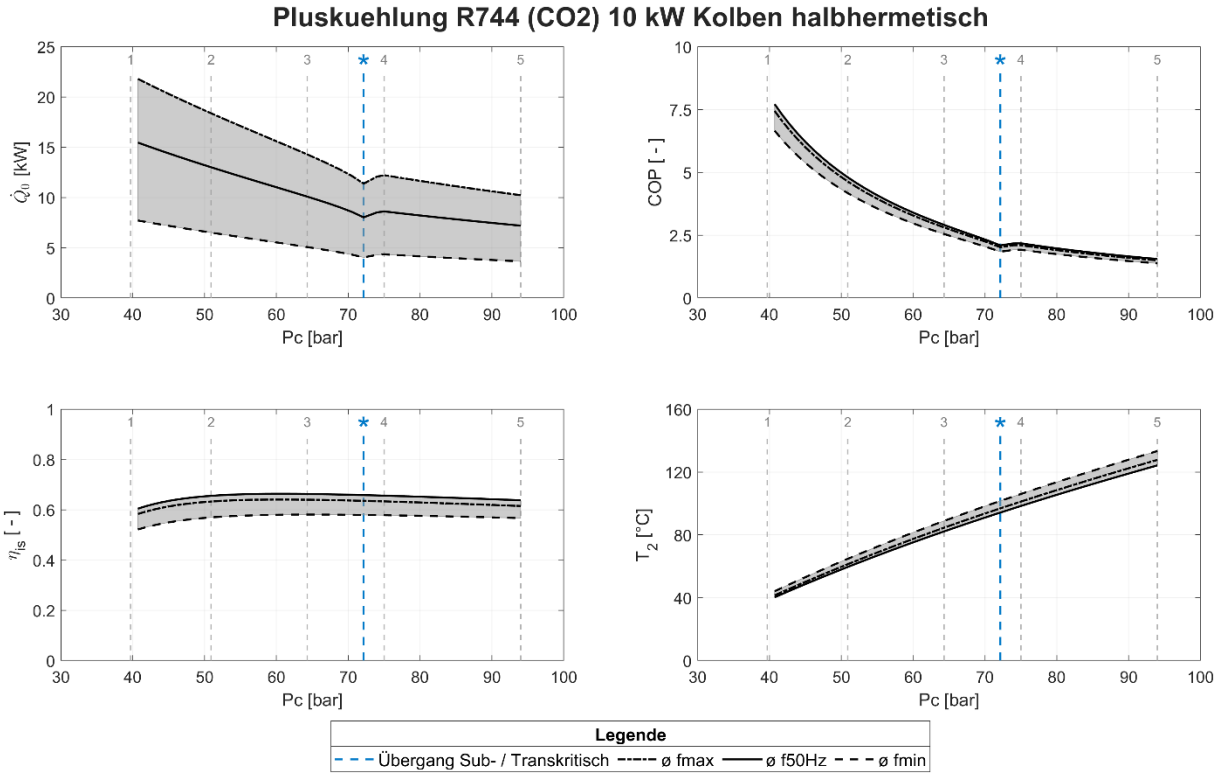

Pluskuehlung R513A 2 kW Kolben hermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

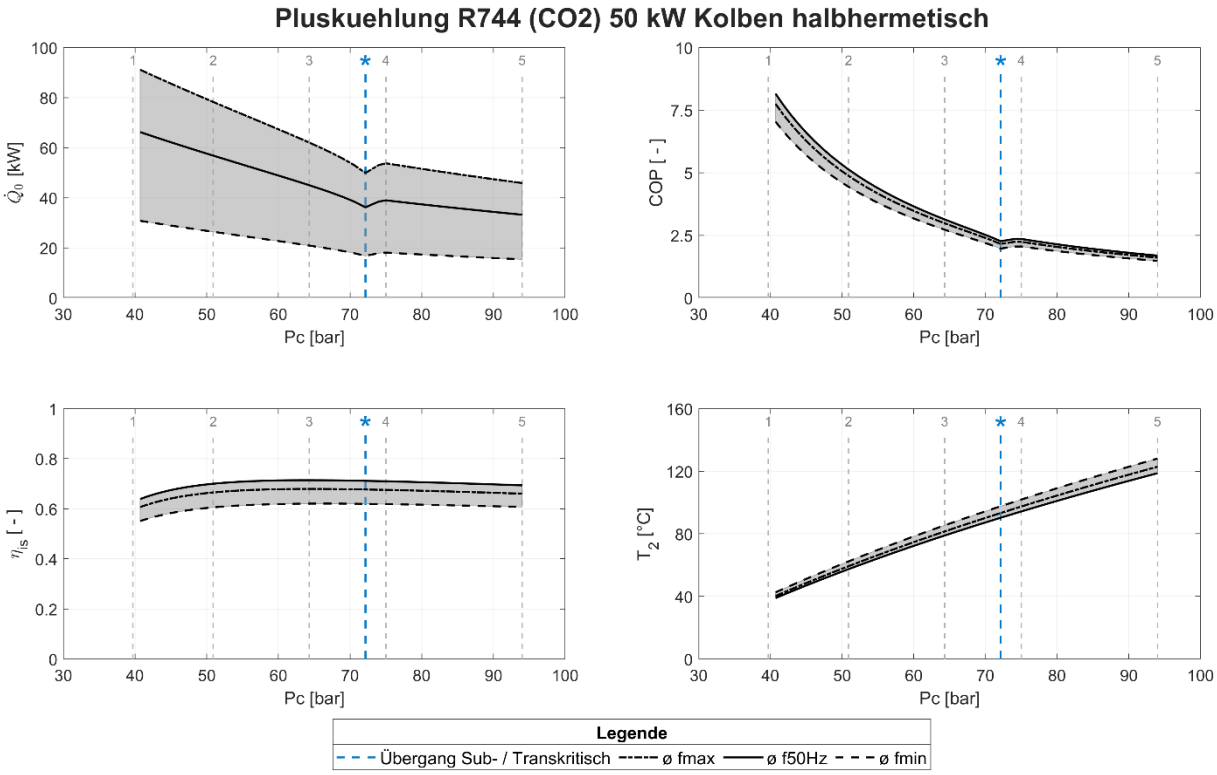

Pluskuehlung R513A 10 kW Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

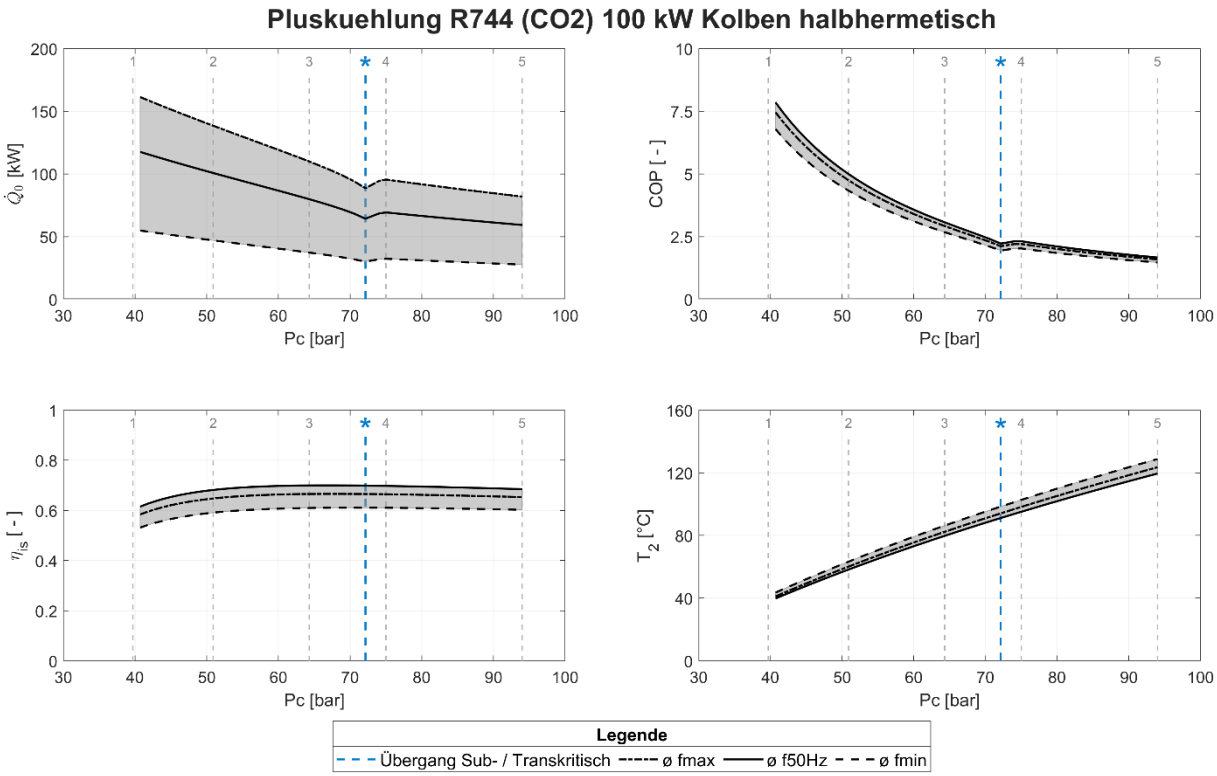

Pluskuehlung R513A 10 kW Kolben hermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin


Pluskuehlung R513A 50 kW Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

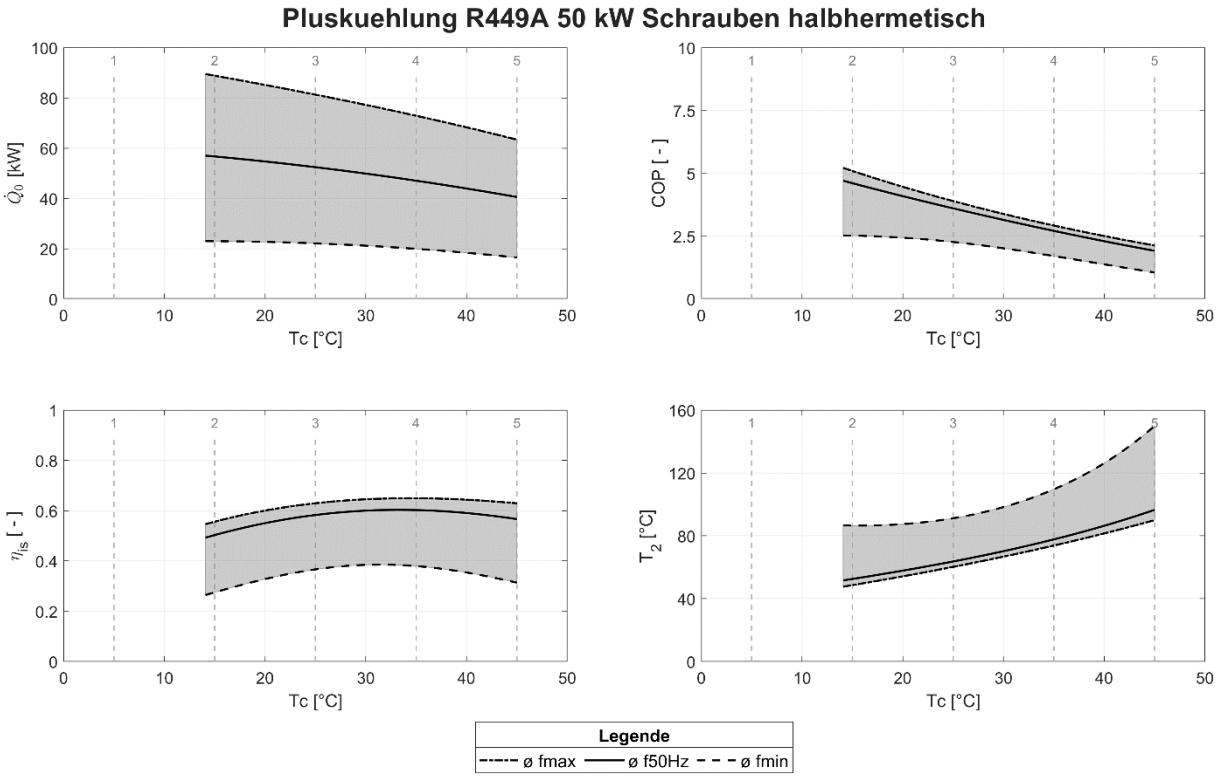

Pluskuehlung R513A 100 kW Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

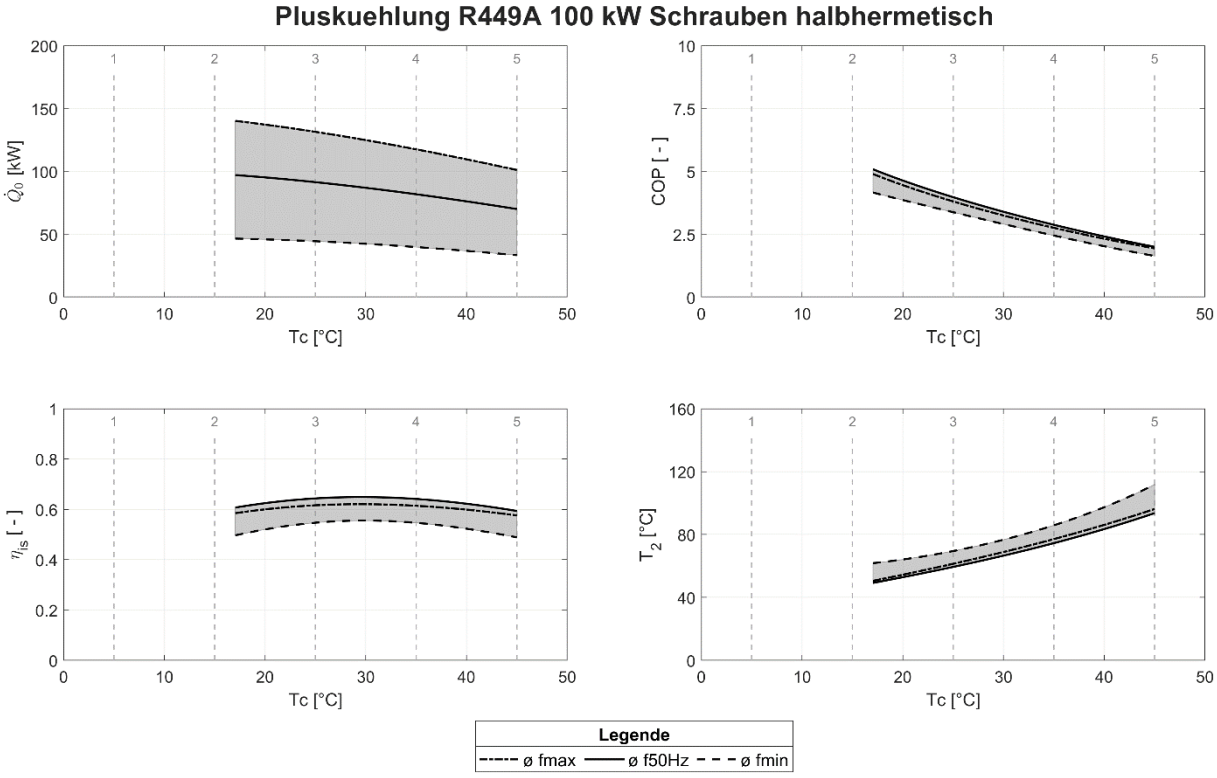

Pluskuehlung R744 (CO2) 10 kW Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Pc [bar]
Legende
Übergang Sub- / Transkritisch
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

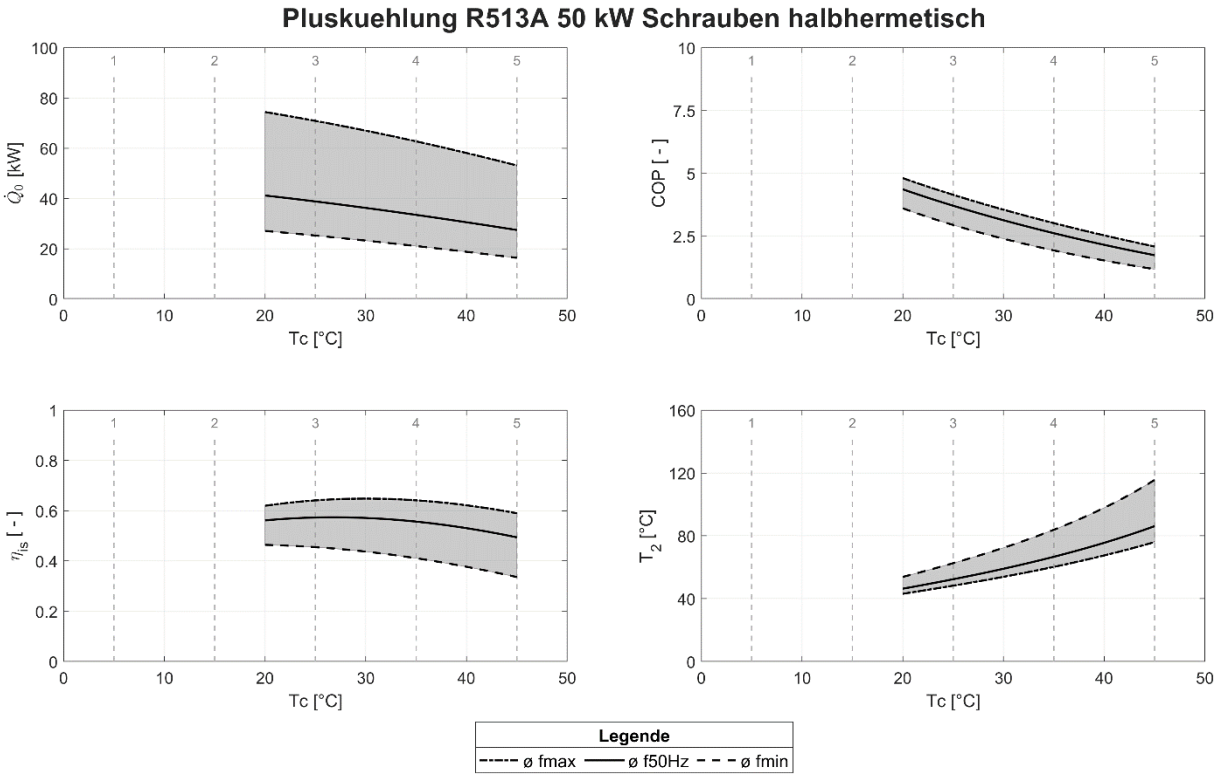

Pluskuehlung R744 (CO2) 50 kW Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Pc [bar]
Legende
Übergang Sub- / Transkritisch
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

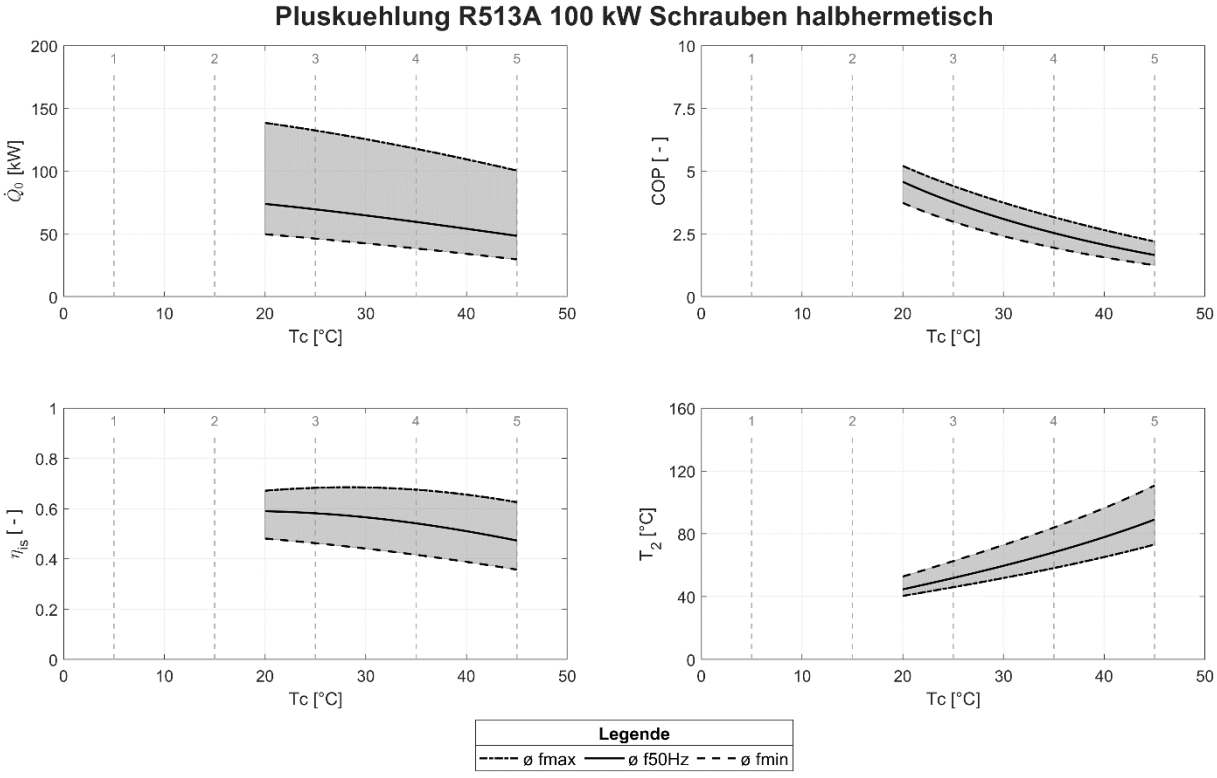

Pluskuehlung R744 (CO2) 100 kW Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Pc [bar]
Legende
Übergang Sub- / Transkritisch
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

D.2.3 Schrauben Pluskühlung



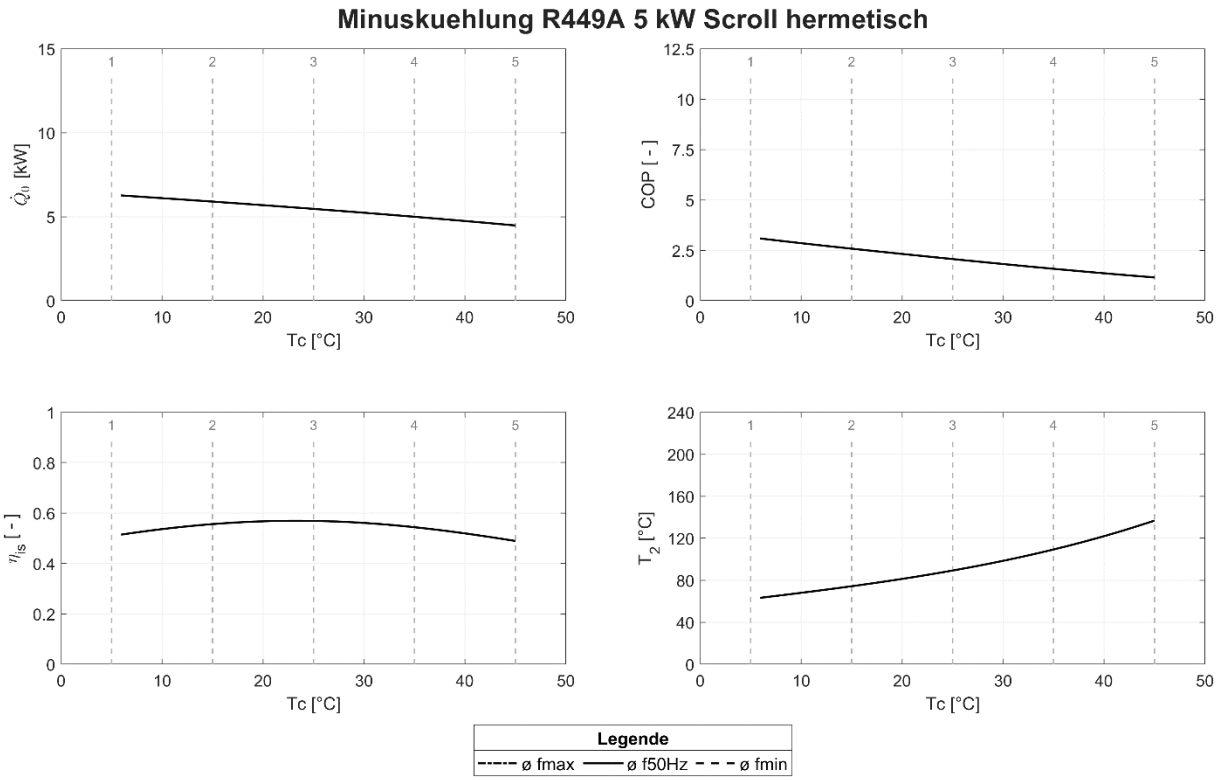


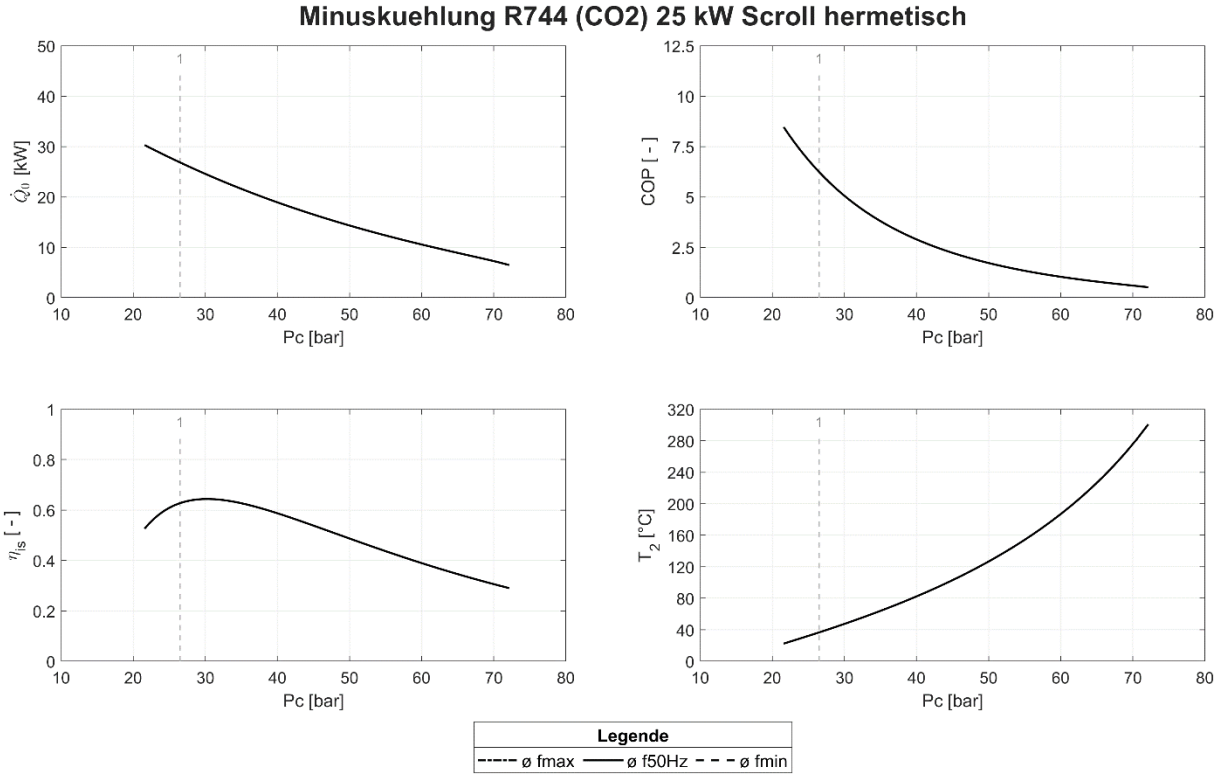

Pluskuehlung R513A 50 kW Schrauben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin


Pluskuehlung R513A 100 kW Schrauben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

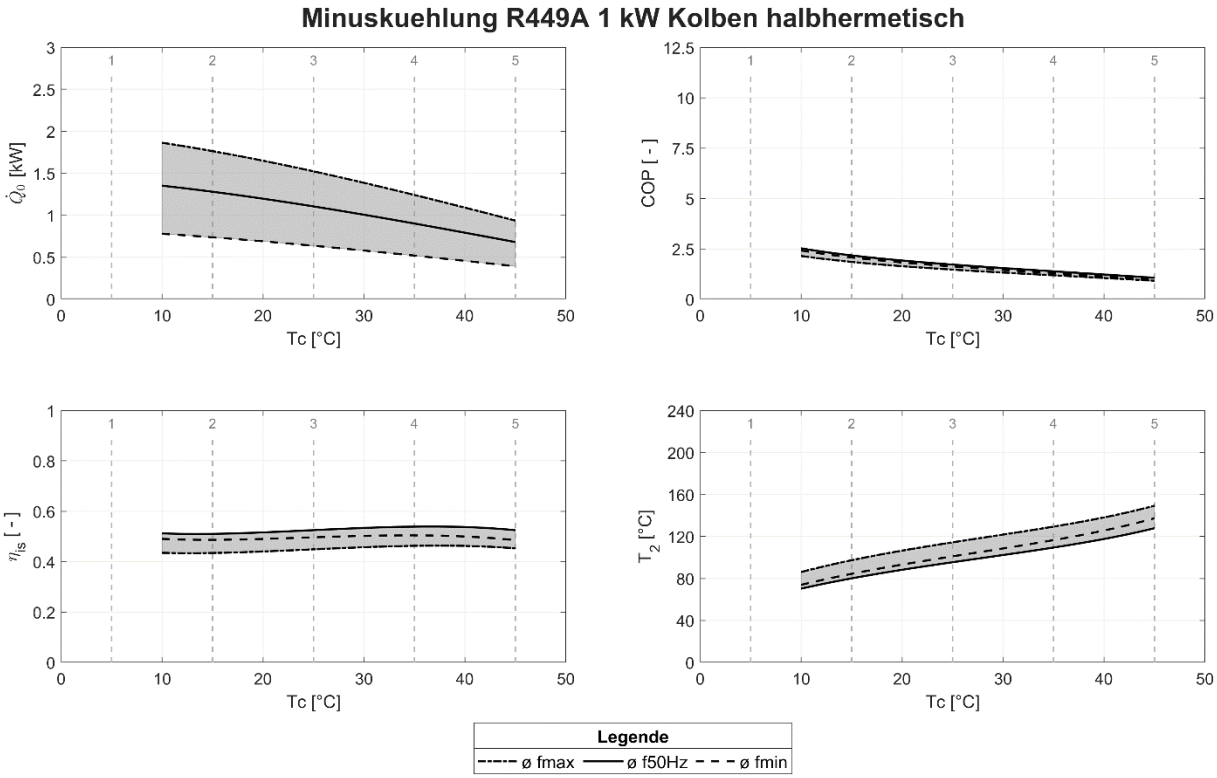
D.3 Verdichter-Kennfelder Minuskühlung

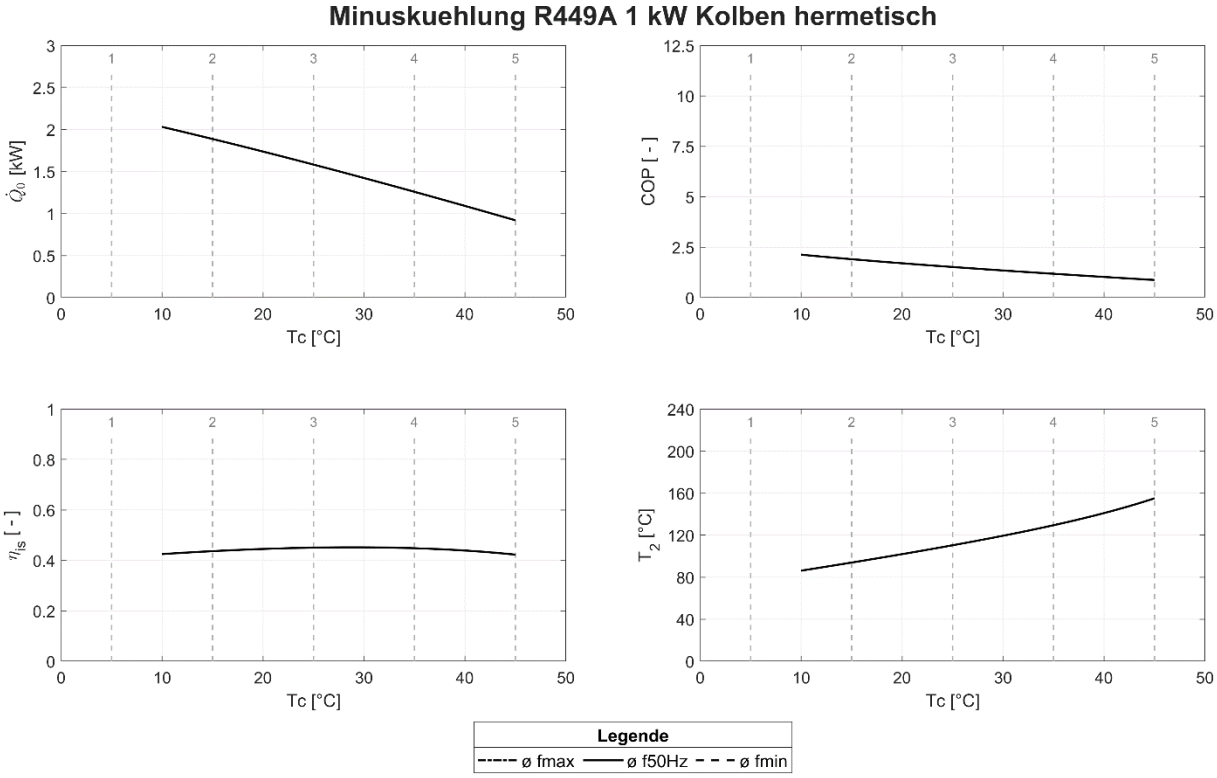
D.3.1 Scroll Minuskühlung

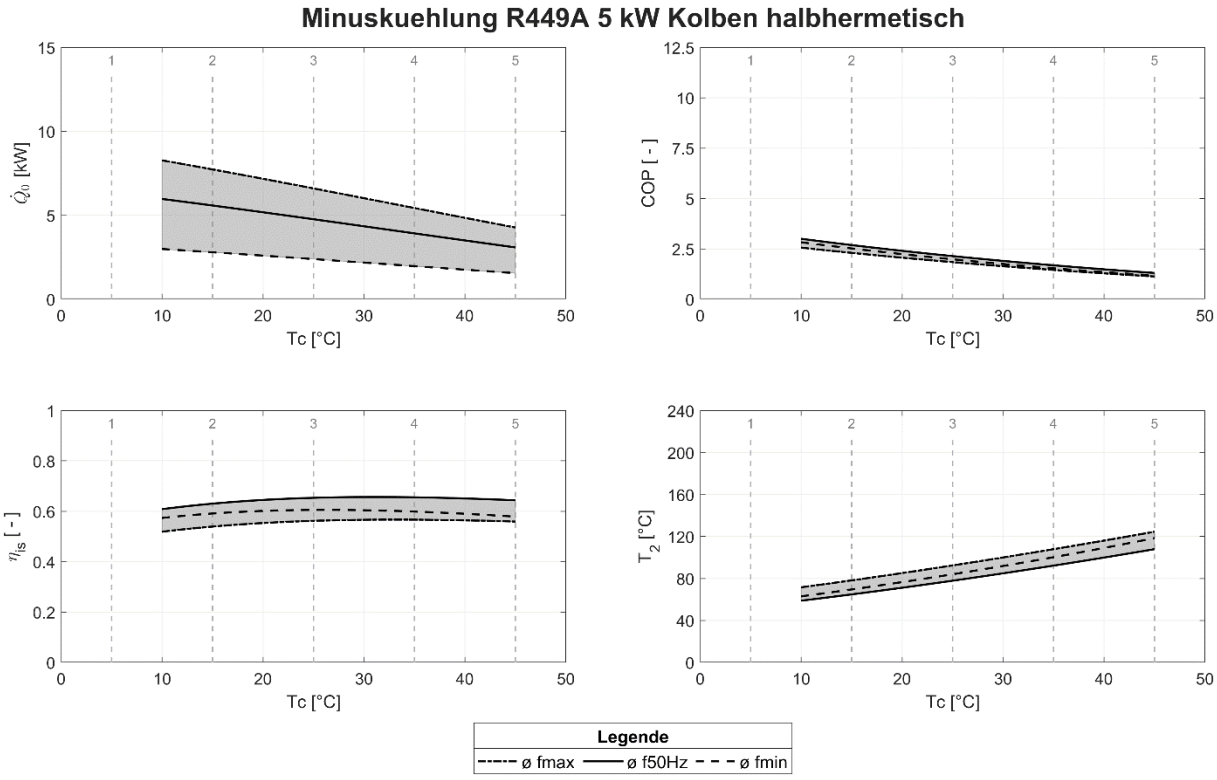


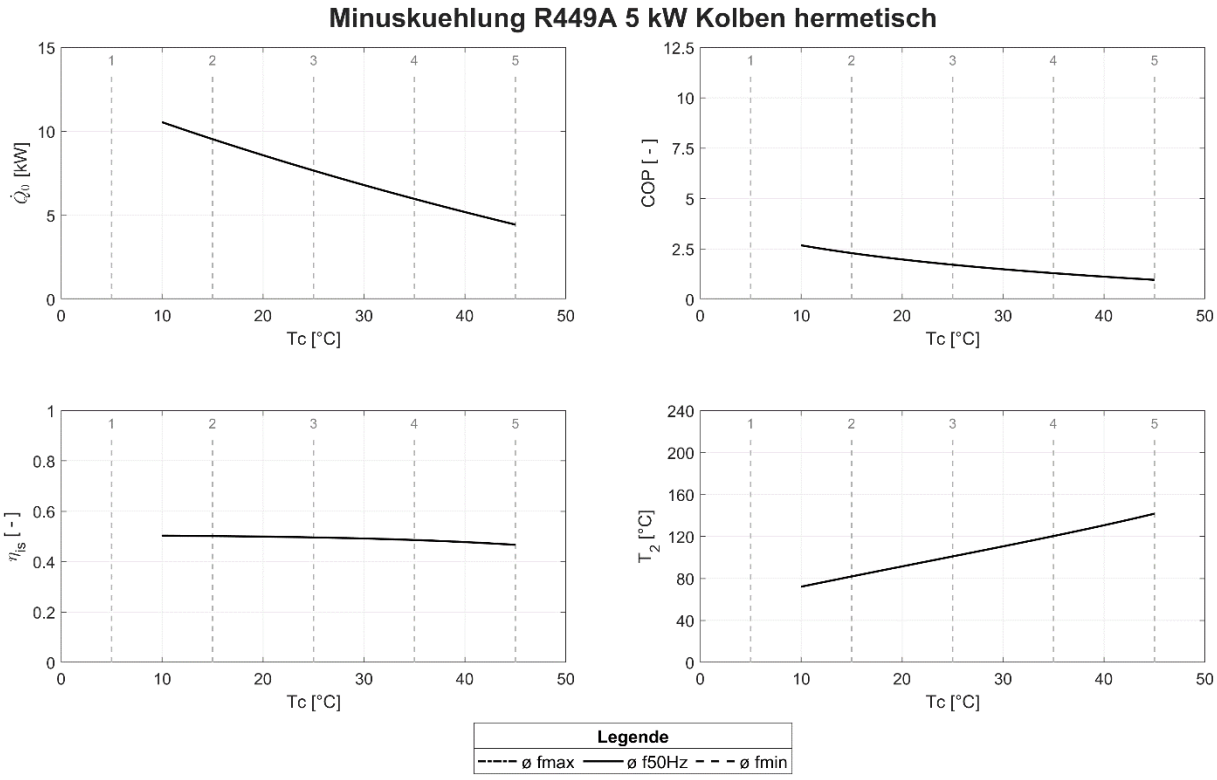


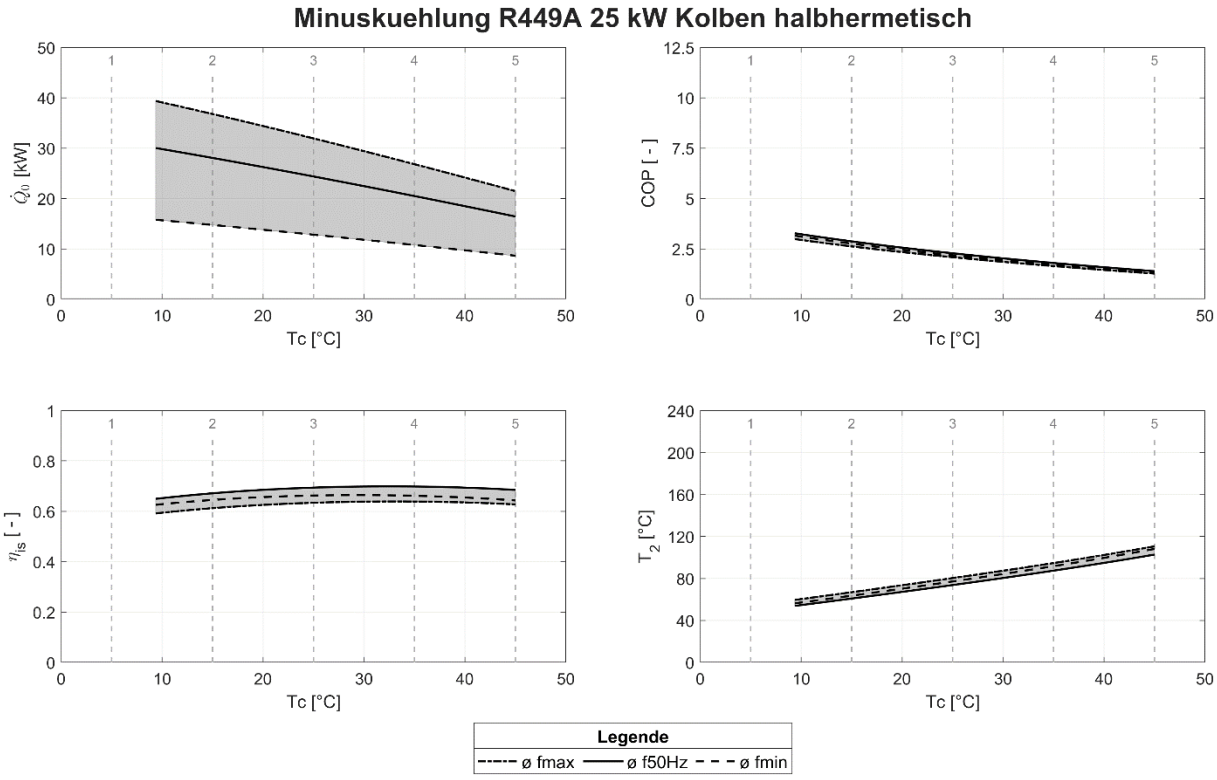
D.3.2 Hubkolben Minuskühlung

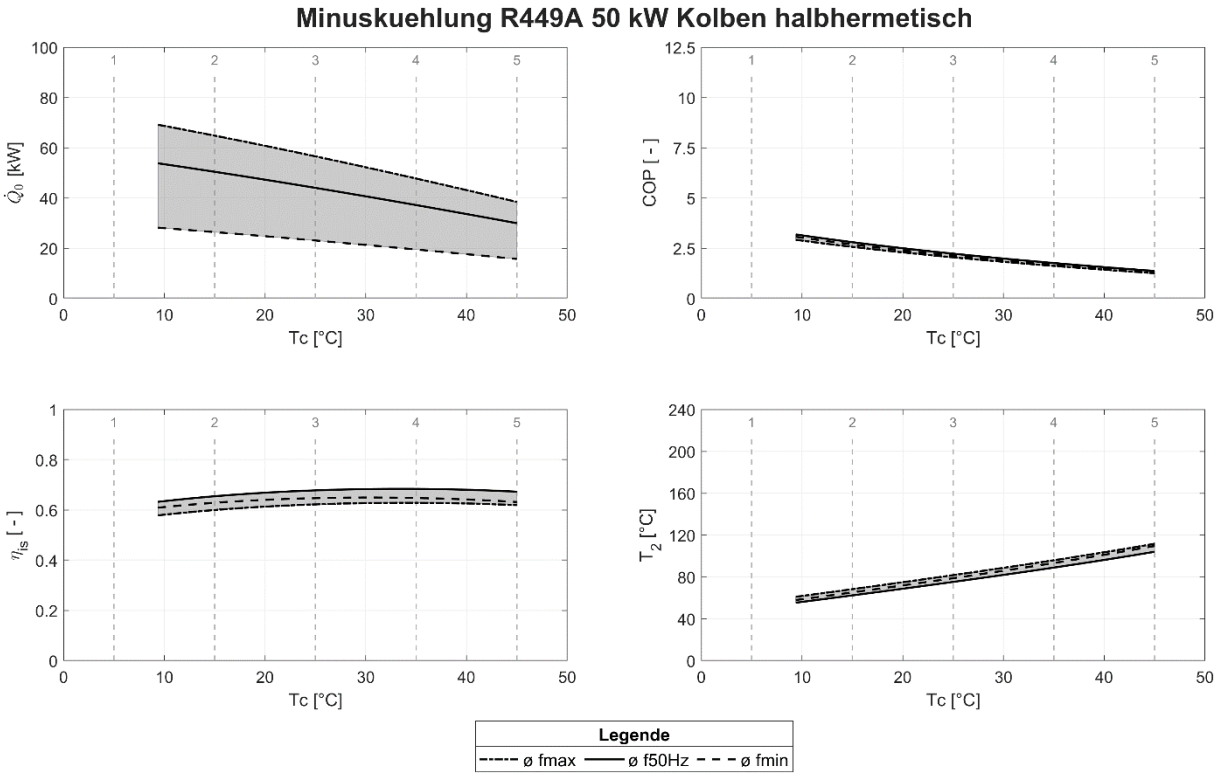


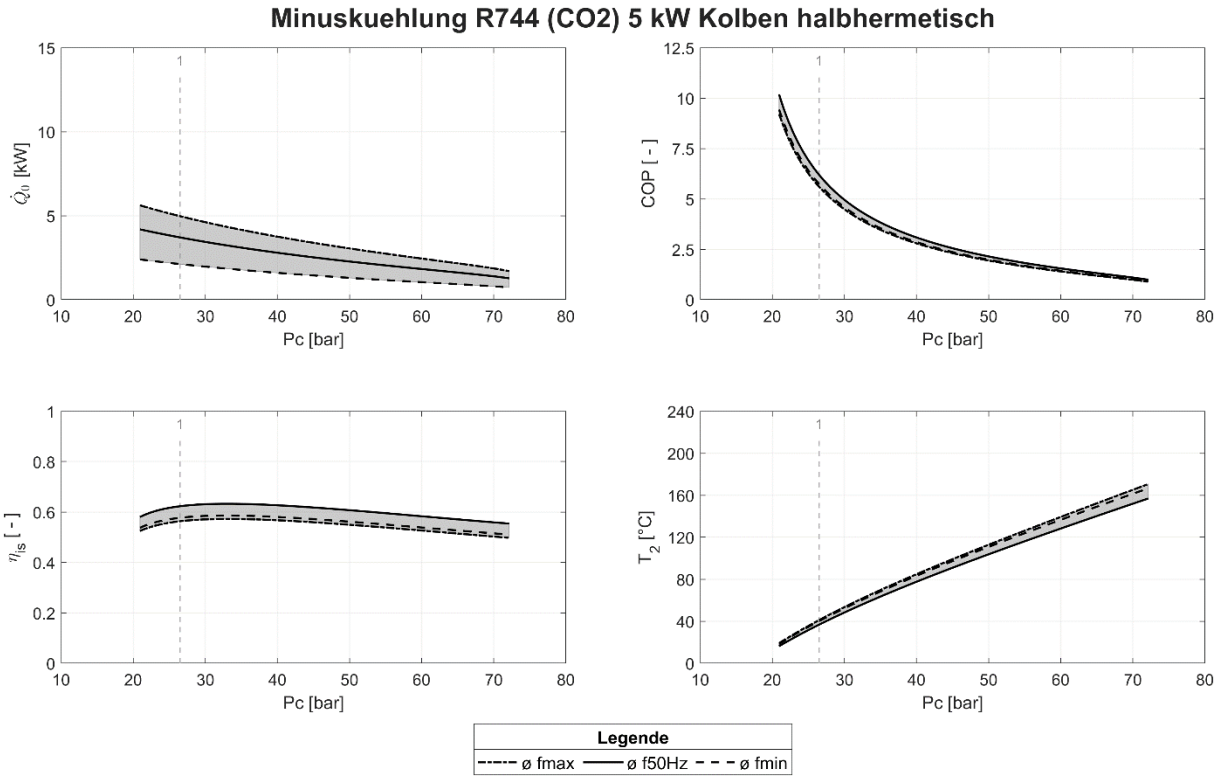


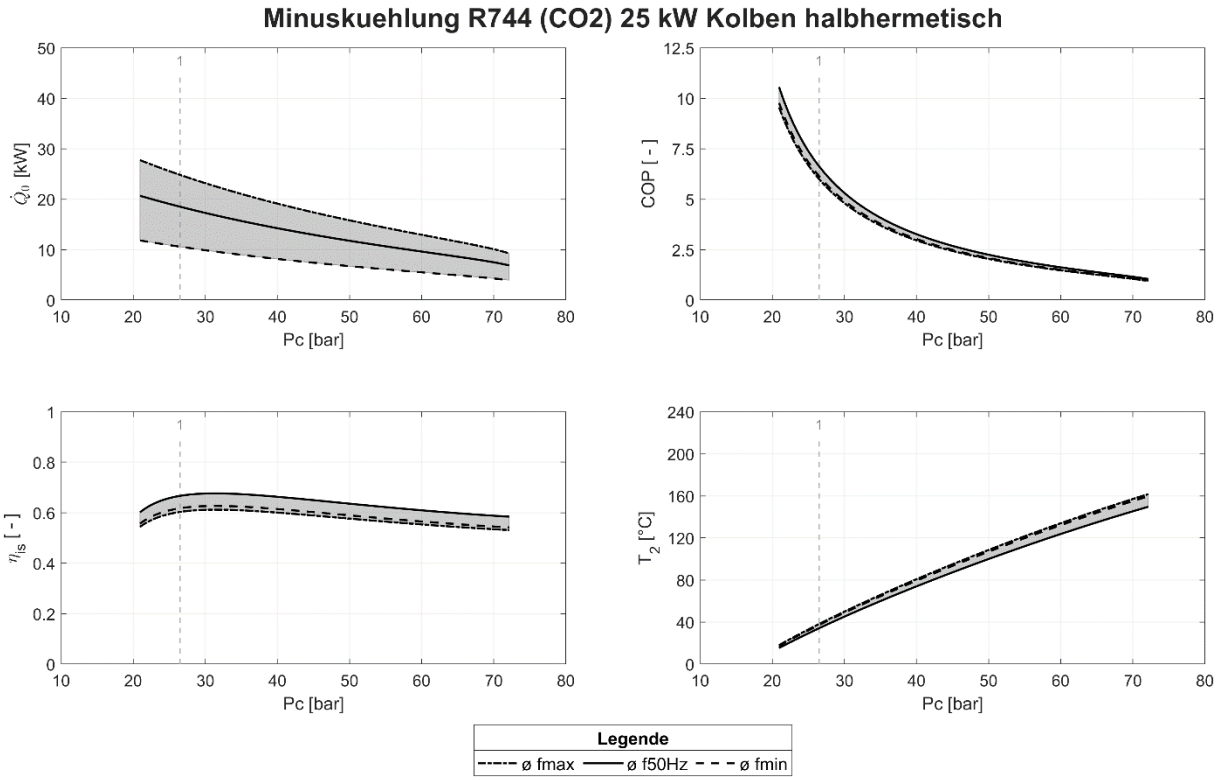

Minuskuehlung R449A 5 kW Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

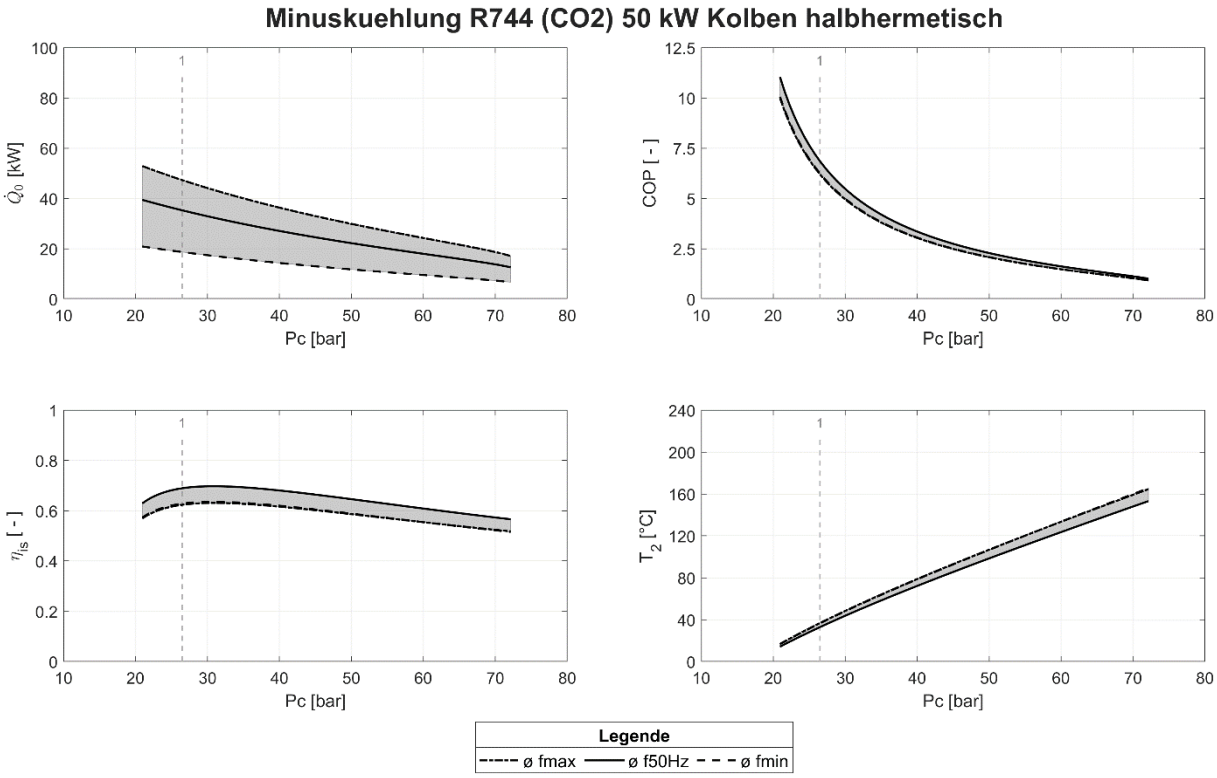

Minuskuehlung R449A 5 kW Kolben hermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin


Minuskuehlung R449A 25 kW Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

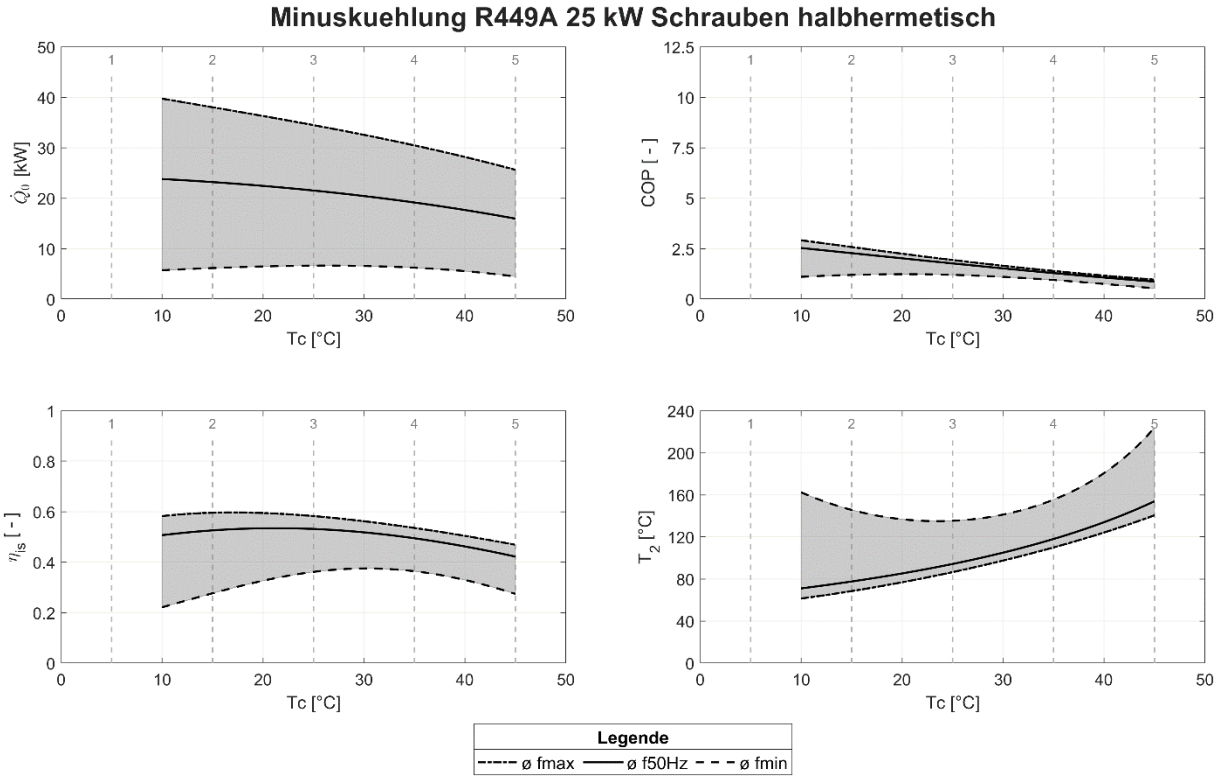

Minuskuehlung R449A 50 kW Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin

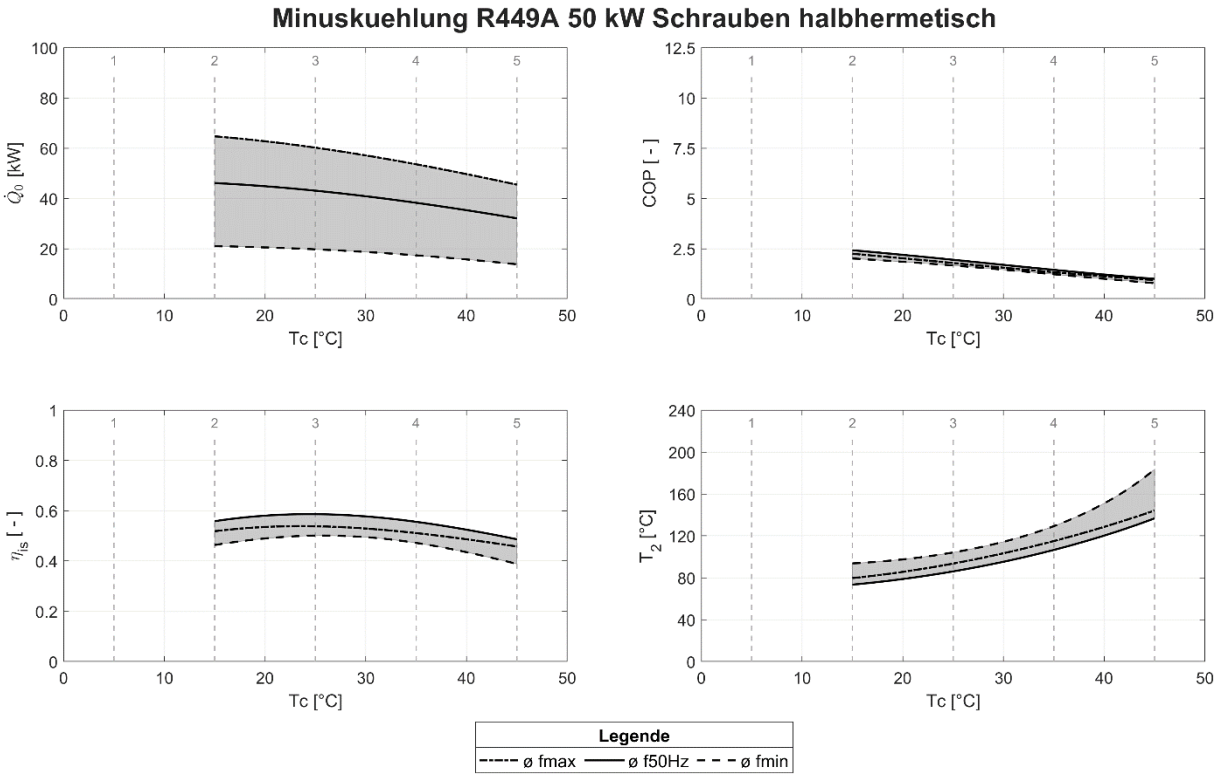

Minuskuehlung R744 (CO2) 5 kW Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Pc [bar]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin


Minuskuehlung R744 (CO2) 25 kW Kolben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Pc [bar]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin



D.3.3 Schrauben Minuskühlung




Minuskuehlung R449A 50 kW Schrauben halbhermetisch
$\dot{Q}_0$ [kW]
COP [-]
η_{is} [-]
T_2 [°C]
Tc [°C]
Legende
ø fmax
ø f50Hz
ø fmin