



Diplomarbeit

Ölgehalt im Kältemittelkreislauf einer PKW-Klimaanlage

von
Rainer Mauthner

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur

Studienrichtung: Maschinenbau, Energie und Umwelttechnik

Technische Universität Graz
Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften

Betreuer: Ao.Univ.-Prof. René Rieberer
Institut für Wärmetechnik

Graz, 2011

Kurzfassung:

Titel:

Ölgehalt im Kältemittelkreislauf einer PKW-Klimaanlage

Schlagwörter

Schallgeschwindigkeit, R134a, R1234yf

In PKW-Klimaanlagen werden meist Hubkolbenkompressoren eingesetzt, für die eine Schmierung nötig ist. Das teilweise im Kältekreislauf zirkulierende Schmieröl ist einerseits für die Anlage „überlebenswichtig“, andererseits beeinflusst es aber Anlagenleistung und Effizienz negativ.

Die Ölumlauftrate (OCR... Oil Circulation Ratio) wird wesentlich vom eingesetzten Kältemittel, Kompressor und den Betriebsbedingungen beeinflusst. Die Bestimmung der Ölumlauftrate ist speziell im Entwicklungsstadium von großer Bedeutung. Daher werden unterschiedliche Verfahren zur Messung des OCR eingesetzt. In dieser Arbeit werden mögliche Verfahren aufgelistet und diskutiert.

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt in der Bestimmung der Ölkonzentration mittels Schallgeschwindigkeitsmessung. Es werden die unterschiedlichen Einflüsse auf die Schallgeschwindigkeit behandelt. Ein Messstand wurde errichtet, an dem die Schallgeschwindigkeit von Öl/Kältemittel-Gemischen bei unterschiedlichen Temperaturen und Drücken ermittelt werden kann. Durch die Bestimmung einer geeigneten Ausgleichskurve kann in System- und Komponentenprüfständen (z.B. Kompressorprüfständen) der Ölgehalt im Kältemittel durch die Messung von Druck, Temperatur und Schallgeschwindigkeit ermittelt werden. Diese Ausgleichskurve wird an Messdaten von einem Komponenten Prüfstand angewendet und diskutiert.

Abschließend wird der Einfluss des Öls auf die Verdampferleistung näher betrachtet.

Abstract

Title:

Oil content in the refrigerant circuit of a passenger car air conditioning system

Tags:

sound speed, R134a, R1234yf

Normally reciprocating compressors air conditioning systems for passenger cars are used. On the one hand the compressor use an oil for lubrication, but on the other hand oil in the refrigerant flow degrades the efficiency of the air conditioning.

The OCR (Oil Circulation Ratio) depends on the used refrigerant, oil compressor type and operating conditions. The detection of OCR is especially important in the development process. There exist a few principles for detecting the oil circulation ratio.

This paper, describes briefly possible methods for dedecting OCR, but the main focus layson detecting the OCR by means of sound speed measurements. This work consider the impact of oil on the speed of sound. A test bench was constructed, for measuring the speed of sound at different pressures, temperatures and oil concentrations. With a suitable fitting curve the oil content can be determined in other processes, by detecting temperature, pressure and speed of sound of the mixture.

The developed fitting curve is applied on measuring points from a components test bench.

Finally the impact of oil at the refrigerating capacity will considered

Vorwort

Robert Lee Frost sagte: *„Bildung ist die Fähigkeit, sich fast alles anhören zu können, ohne die Ruhe oder das Selbstvertrauen zu verlieren.“*

Ich nutze diese Gelegenheit, um mich bei meinen Eltern, die mich stets auf meinem Ausbildungs- und Bildungsweg sowohl finanziell als auch mental unterstützt haben, zu bedanken. Besonderer Dank gilt auch meinen Freunden, mit denen ich mich gemeinsam für Prüfungen vorbereitet habe, die aber auch die gleiche Neugierde teilten, das Gelernte an Phänomenen im Alltag zu diskutieren. Sowie den Freunden, die ihren Lebensweg nicht in Richtung Technik eingeschlagen haben, und mir evtl. gerade deswegen meinen Horizont erweiterten.

Ich danke auch meinem Betreuer Prof. Rieberer und DI. Dr. Kitanoski, die mich mit Rat und Tat bei der Durchführung dieser Arbeit unterstützten.

Ein herzliches Dank gilt auch den Mitarbeitern am Institut für Wärmetechnik, die mich für das durchführen dieser Arbeit entscheidend unterstützt haben.

Desweiteren bedanke ich mich bei den Mitarbeitern des virtual vehilce, die sich während der gesamten Dauer stets Zeit für mein Anliegen nahmen.

Herzlichen Dank

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 08.04.2011

.....
(Unterschrift)

Inhaltsverzeichnis

Ölgehalt im Kältemittelkreislauf einer PKW-Klimaanlage	I
Kurzfassung:	II
Abstract	III
Vorwort	IV
Eidesstattliche Erklärung	V
1 Einleitung	1
1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung	1
1.2 Motivation	1
1.3 Kreisprozess einer Kälteanlage	2
1.4 Verdichter	4
1.5 Eigenschaften von Kältemittel	5
1.5.1 Kältemittel R134a	6
1.5.2 Kältemittel R1234yf (HFO 1234yf)	6
2 Grundlagen	8
2.1 Ölkonzentration in Kältemittel	8
2.2 Öl im Kältemittel	9
2.3 Die Schallgeschwindigkeit	11
2.3.1 Schallgeschwindigkeitsänderung von R134a	12
2.3.2 Schallgeschwindigkeitsänderung von R1234yf	13
2.3.3 Zusammenfassung der Schallgeschwindigkeitseinflüsse	14
2.4 Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit durch Öle	15
2.5 Einfluss der Ölkonzentration auf die Verdampfungstemperatur	16
2.6 Entmischung von Öl in Kältemittel	22
3 Messstand	23
3.1 Bauteile	25
3.1.1 Zahnradpumpe	25
3.1.2 Temperierung des Messstandes	25
3.1.3 Druckbegrenzung (Sicherheitsabschaltung)	26
3.1.4 Ausdehnungsgefäß	26
3.1.5 Entleerungsbehälter	27
3.1.6 Öldosierung	28
3.1.7 Befüllungsbehälter	28
3.1.8 Service Gerät für Autoklimaanlagen	29
3.1.9 T-Stückeinlage	29
3.2 Messtechnik	30
3.2.1 Messauswerteeinheit	30
3.2.2 Druckmessung	30
3.2.3 Schallmessgerät	30
3.2.4 Temperaturmessung	31
3.3 Befüllungsvorgang:	32
3.4 Ablauf der Messung	39
3.5 Datenloggerprogramm	40
3.6 Messmatrix	43
3.7 Entleerungsvorgang	45
3.8 Recycling des Kältemittels	46
4 Messauswertung	47
4.1 Diskussion der Vermessung von reinem R134a	47

4.2	Reproduzierbarkeit der R134a_Messdaten	51
4.3	Messergebnisse reines R1234yf	54
4.4	Reproduzierbarkeit der R1234yf Messdaten.....	55
4.5	Ausgleichskurve	57
4.5.1	Ausgleichskurve für R134a und Öl A	60
4.5.2	Ausgleichskurve für R1234yf und Öl 1.....	63
4.6	Entmischung von Öl A im Kältemittel R1234yf.....	65
4.7	Berechnung der Messunsicherheiten.....	67
4.7.1	Allgemein.....	67
4.7.2	Berechnung	69
4.8	OCR Bestimmung in einem realen Kältekreis	72
5	Einfluss des Öles auf die Verdampferleistung	74
5.1	Berechnungsmethode nach Burger.....	76
5.2	Berechnungsmethode nach Thome	77
5.3	Korrektur des Kältemittelmassenstroms.....	81
5.4	Gegenüberstellung der Berechnungsmethoden.....	81
5.5	Vergleich mit Messungen	83
5.6	Fazit.....	84
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	87
7	Literaturverzeichnis.....	89
8	Tabellenverzeichnis.....	91
9	Abbildungsverzeichnis	92
10	Anhang.....	94
10.1	Messergebnisse von R134a und Öl A.....	94
10.2	Messpunkte von R1234yf und Öl 1	103

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

In einem Kälteprozess ist für den Verdichter eine gewisse Ölmenge erforderlich, um die Schmierung der bewegten Teile im Verdichter zu garantieren und somit die Lebensdauer zu erhöhen. Außerdem hilft das Öl, diverse Spalte im Verdichter abzudichten um das Kältemittel am Rückströmen zu hindern.

Das Öl beeinflusst jedoch die Effizienz des Prozesses negativ. Deswegen soll sich nur maximal so viel Öl im Kreislauf befinden wie unbedingt nötig ist.

Um die Ölmenge feststellen zu können, kann mittels verschiedener Messverfahren die Menge bestimmt werden. Im Zuge dieser Arbeit wurde ein Messstand errichtet, mit dem die Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Temperatur, Druck und Ölgehalt bestimmt werden kann. Mit dieser Datenbasis soll der Zusammenhang von Temperatur, Druck und Schallgeschwindigkeit gefunden werden und damit in anderen Messständen auf die Ölkonzentration geschlossen werden.

Der Messstand wurde so gefertigt, dass die Messpunkte möglichst automatisch angefahren werden. Es wurde darauf geachtet, dass die Materialbeständigkeit sehr hoch ist, um auch Kältemittel mit noch unbekanntem Eigenschaften vermessen zu können.

Konkret lauten die Ziele dieser Arbeit:

- Recherche über die möglichen Verfahren zur Bestimmung des Ölgehalts in einem Kältemittelkreislauf.
- Auslegung, Aufbau und Inbetriebnahme eines Versuchstandes
- Vermessung von Öl/Kältemittel-Gemischen.
- Bestimmung einer Funktion, welche die Messpunkte möglichst genau für ein Öl/Kältemittel-Gemisch abdeckt.
- Die Funktion soll anschließend bei einem realen Kältekreislauf angewendet werden.
- Rechnerische Unsicherheitenabschätzung der ermittelten Kälteleistung und Effizienz ohne/mit Kenntnis der Ölumlaufzeit (OCR) in einem realen Kältekreislauf

1.2 Motivation

Die derzeit verwendete Berechnungsmethode für den Ölgehalt hatte bei Konzentrationen unter 1 % Schwierigkeiten, eine vertrauenswürdige Aussage zu treffen. Wurden Stoffwerte von einem reinem Kältemittel eingesetzt, so erhielt man nicht einen Ölgehalt von 0 %.

Die dafür verwendete Funktion beruht auf Messdaten, die zwischen 20 und 70°C, 1 und 8 % OCR und je drei Druckpunkte pro vermessener Temperatur aufbaut. Da in

1. Einleitung

den heutigen verwendeten Verdichtern sich meist weniger als 1 % Öl im Kältekreislauf befindet, musste stets mit dieser Funktion extrapoliert werden.

In dieser Arbeit soll eine zuverlässigere Funktion gefunden werden, die auch den Bereich zwischen 0 und 1 % Öl abdeckt.

1.3 Kreisprozess einer Kälteanlage

Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik besagt, dass Wärme nie von einem kälteren Körper zu einem wärmeren fließen kann. Siehe dazu Baehr, (2002)

Um es technisch möglich zu machen, muss eine Wärmepumpe verwendet werden.

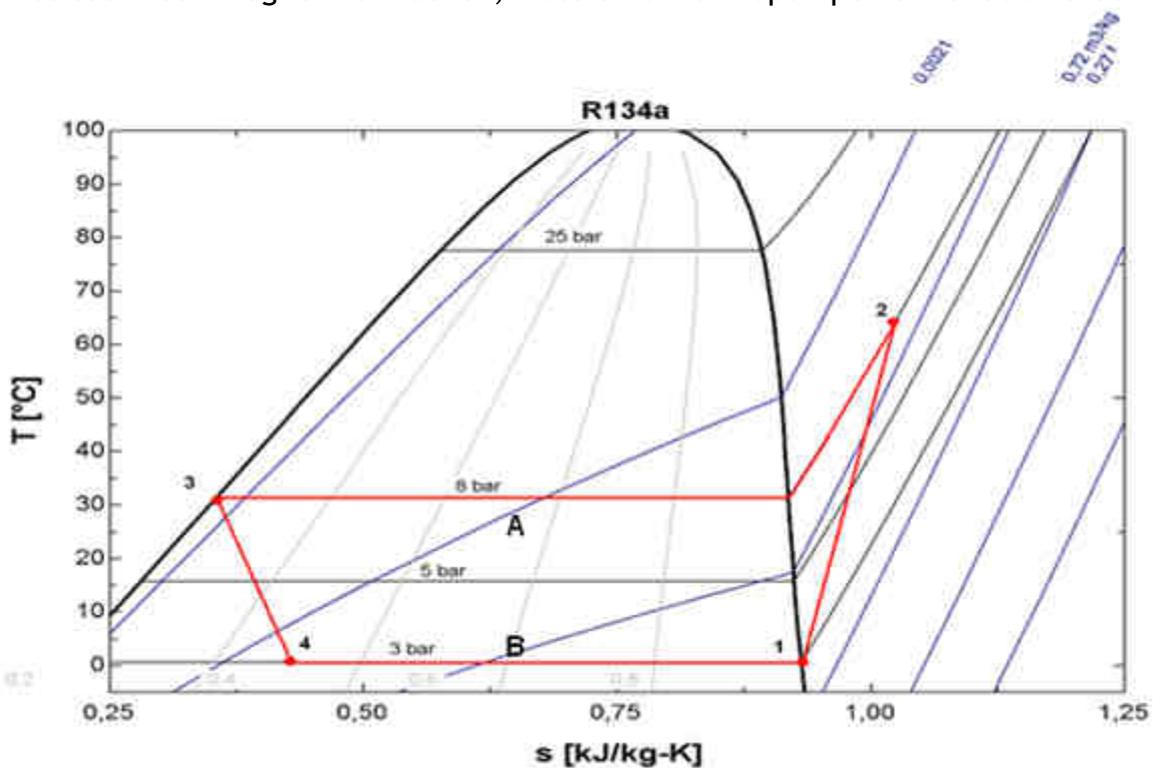


Abbildung 1-1 Darstellung eines Kälteprozesses

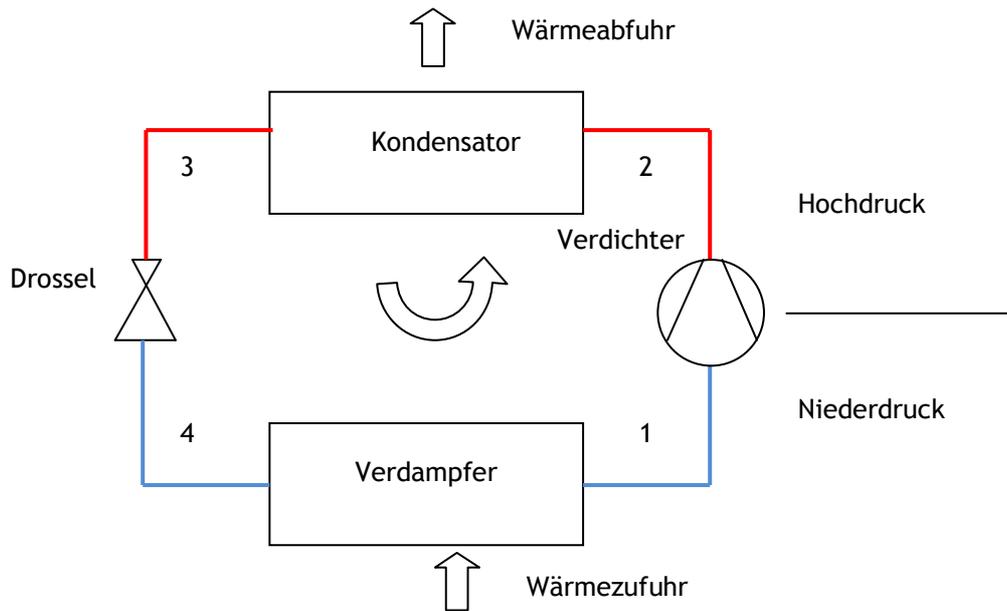


Abbildung 1-2 systematischer Aufbau eines Kälteprozess

Die Funktionsweise einer Wärmepumpe, der sogenannte Kälteprozess, ist in Abbildung 1-1 in einem T/s-Diagramm dargestellt. Der schematische Aufbau in Abbildung 1-2.

1. Das Arbeitsmedium (Kältemittel) wird im verdampften Zustand verdichtet. Es wird von dem Druck bei dem es verdampfte auf einen höheren Druck verdichtet. Durch die Energiezufuhr im Kompressor erhöht sich die Temperatur des Kältemittels. Für den Antrieb des Verdichters muss mechanische Energie aufgewendet werden. In einem Auto wird diese durch den Motor erzeugt.
2. Im nächsten Schritt wird das Kältemittel isobar abgekühlt und kondensiert. Da das Kältemittel zu diesem Zeitpunkt einen höheren Druck besitzt, kondensiert es bereits bei höheren Temperaturen. Der Umkehrschluss lautet, dass ein Medium bei höheren Drücken auch bei höheren Temperaturen verdampft. Damit das Kältemittel allerdings kondensiert, muss es Wärme im Kondensator abgeben. Damit die Wärme fließen kann, muss die Temperatur allerdings höher sein, als die der Umgebung.
3. Der dritte Schritt ist die isenthalpe Druckreduzierung durch eine Drossel auf den ursprünglichen Verdampfungsdruck. Dabei reduziert sich der Druck des Arbeitsmediums und verliert an Temperatur. Es wird ein gewisser Anteil des Kältemittels bereits in der Drossel dampfförmig. Der restliche Teil liegt flüssig vor.
4. Beim letzten Schritt muss das flüssige Kältemittel verdampfen, bevor es wieder zum Verdichter gelangt. Bei diesem Schritt wird Wärme im Verdampfer zugeführt. Dafür muss allerdings die Umgebungstemperatur höher als die des Kältemittels sein.

Mit diesen vier Zustandsänderungen gelingt es, Wärme von einem tieferen zu einem höheren Temperaturniveau zu „pumpen“. Aus Abbildung 1-1 lässt sich erkennen, dass die Temperatur zwischen den Punkten 2 und 3 (2.Schritt) höher liegt, als zwischen den Punkten 4 und 1 (4. Schritt). Bei diesen zwei Zustandsänderungen wird jeweils Wärme ab-, bzw. zugeführt.

In den letzten Jahren spielt der Komfort eine immer größere Rolle, deshalb wurde in den neunziger Jahren immer öfter eine Kühlung im Auto verbaut. Die Kühlleistung kann je nach Sonneneinstrahlung und Größe des Autos 5 kW betragen (siehe Rieberer et al. 2009).

Dies ist das Prinzip einer Wärmepumpe, welche in den meisten Autos, in jedem Kühlschrank und z.T. in Gebäuden zur Bereitstellung von Wärme verwendet wird.

1.4 Verdichter

Der Verdichter in einer PKW Klimaanlage wird über einen Riemenantrieb vom Motor angetrieben. Das hat zur Folge, dass die Motordrehzahl direkt auf die Verdichterdrehzahl weitergegeben wird. Die geforderte Kühlleistung hängt allerdings nicht von der Drehzahl des Motors ab.

Herkömmliche Kolbenverdichter würden aus diesem Grund zu viel Kältemittel durch den Kreislauf befördern, was bei einer größeren Drehzahl des Motors eine zu große Kälteleistung zur Folge hätte.

Eine Taktung der Klimaanlage fällt aufgrund der daraus resultierenden Unbehaglichkeit im Fahrzeuginneren aus.

Aus diesem Grund werden in Europa meist Schwenkscheibenkompressoren verwendet. Hierbei handelt es sich um einen Kolbenverdichter, bei dem der Hub der benötigten Kälteleistung angepasst werden kann. Dies wird realisiert, indem eine schrägstehende Scheibe rotiert (siehe Abbildung 1-3).

Durch die Drehbewegung der Scheibe werden die Kolben auf und ab bewegt.

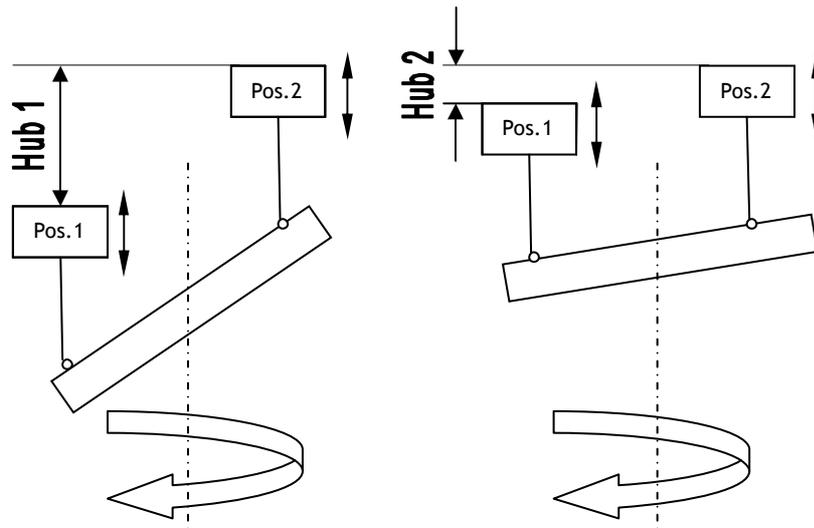


Abbildung 1-3 Prinzip des Verdichters

Wird die Scheibe flach gestellt, ist der maximal mögliche Hub geringer als bei einer größeren Schräglage. Dies ist in der Abbildung 1-3 auf der rechten Seite dargestellt. Durch die geringere Schräglage ergibt sich ein geringerer Hub und somit ein geringeres befördertes Volumen.

Um die Schrägstellung der Scheibe zu regeln, wird Kältemittel von der Hochdruckseite verwendet. Dieses Kältemittel erbringt dabei keine Kühlleistung im Verdampfer. Somit wurde das zum Regeln verwendete Kältemittel „umsonst“ verdichtet.

1.5 Eigenschaften von Kältemittel

Für den im letzten Kapitel beschriebenen Kreisprozess ist ein Arbeitsmedium, welches den Kreisprozess durchläuft, notwendig. Solch ein Kältemittel soll möglichst viele dieser Eigenschaften erfüllen:

- Gute thermodynamische Eigenschaften
 - Hohe Verdampfungsenergie
 - Hohe volumetrische Kälteleistung
 - Nassdampfgebiet im Anwendungsbereich
- Nicht Brennbar
- Nicht giftig für Mensch und Natur
- Ein geringes Global Warming Potential (GWP-Wert)
- Kein Ozon Abbaupotential
- Hohe Stabilität

- Gute Mischbarkeit mit Ölen

1.5.1 Kältemittel R134a

Das derzeitig häufig verwendete Kältemittel besonders in Autoklimaanlagen, ist R134a. Die chemische Formel dafür lautet $C_2H_2F_4$ und fällt unter die Hydrogen Fluor Kohlen Wasserstoffe (HFKW).

Die Kennzeichnung R134a lässt bereits auf die chemische Zusammensetzung schließen. Die Aufschlüsselung ist in Rieberer et al. (2009) erklärt

R...Refrigerant

erste Ziffer	Anzahl der Kohlenstoffatome -1
zweite Ziffer	Anzahl der Wasserstoffatome +1
dritte Ziffer	Anzahl der Fluratome

Als das Schwinden der Ozonschicht in den 1970er Jahren bemerkt wurde, musste eine Alternative zu den FCKW (Flur Kohlen Wasserstoffe) gefunden werden. R134a besitzt kein Ozon Abbaupotential, jedoch ein Global Warming Potential (GWP) von $1300 \text{ kg}_{CO_2-e}/\text{kg}$ wie aus Rieberer, et al., (2009) zu entnehmen ist. Der Wert GWP gibt an, um welchen Faktor das Kältemittel ein höheres Treibhauspotenzial als CO_2 bezogen auf 100 Jahre aufweist.

1.5.2 Kältemittel R1234yf (HFO 1234yf)

Die EU schreibt in der Richtlinie zu Klimaanlagen in Kraftfahrzeugen (2006/40/EG) vor, dass ab dem Jahr 2011 für alle neu typisierten Fahrzeuge und ab dem Jahr 2017 für alle neu verkauften Fahrzeuge ein Kältemittel mit einem GWP Faktor von weniger als 150 verwendet werden muss. Von DuPont und Honeywell wurde ein Kältemittel entwickelt, welches dem zur Zeit verwendeten Kältemittel R134a in den thermodynamischen Eigenschaften und Materialverträglichkeiten sehr ähnlich ist.

Es handelt sich dabei um das Kältemittel 2,3,3,3-Tetrafluorprop-1-ene, kurz R1234yf (oder HFO-1234yf). Die chemische Formel für dieses Kältemittel lautet $C_3H_2F_4$.

R...Refrigerant

erste Ziffer	einfache ungesättigte Verbindung
zweite Ziffer	Anzahl der Kohlenstoffatome -1
dritte Ziffer	Anzahl der Wasserstoffatome +1
vierte Ziffer	Anzahl der Fluratome

Der GWP Faktor von R1234yf beträgt 4. Dies beruht auf der schnellen Zersetzung in 11 Tagen in der Atmosphäre Rajiv et al. (2010).

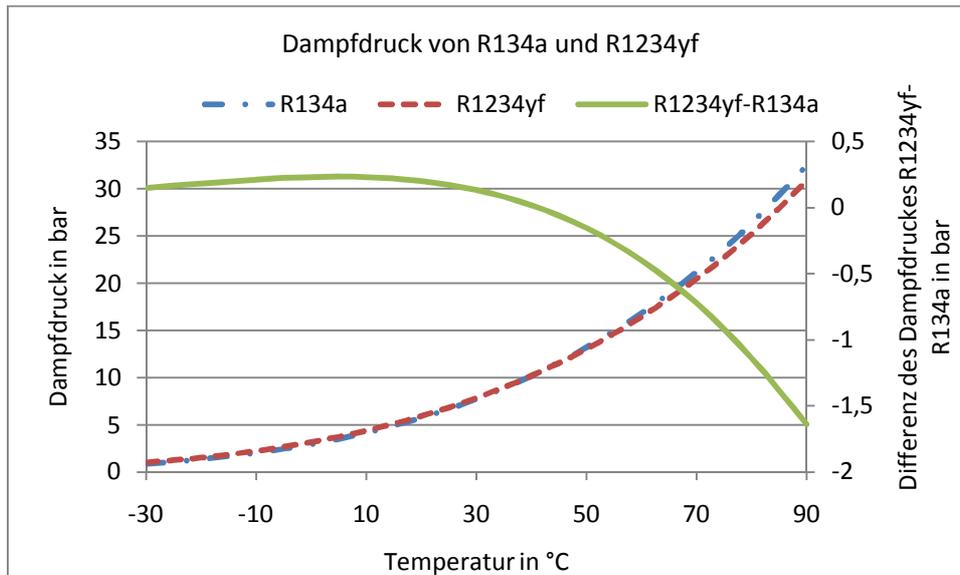


Abbildung 1-4 Dampfdruck von R134a und R1234yf

Abbildung 1-4 zeigt die Ähnlichkeit der beiden Stoffe bezüglich ihrer Dampfdrücke. Die verwendeten Stoffdaten stammen für die beiden Kältemittel (R134a und R1234yf) aus dem Microsoft Excel Add-In Property Rieberer (2006). Bei Property handelt es sich um eine Schnittstelle in Microsoft Excel. Diese Schnittstelle wurde von Rieberer (2006) erstellt und greift auf die Stoffwertetabelle Refprop 9.0 (2010) zu. Diese Stoffwertetabelle verwendet die Daten für R134a von Tillner-Roth, et al., (1994) und die Daten für das Kältemittel R1234yf von Richter, et al., (2010).

R1234yf ist lt. Honeywell (2009) auf Toxizität getestet worden. Es wurden keinerlei negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit festgestellt.

Jedoch liegt der große Unterschied zu R134a darin, dass R1234yf brennbar ist und die Entzündungstemperatur im Labor bei 405 °C liegt (Honeywell 2008). Die minimale Entzündungsenergie beträgt zwischen 5.000 und 10.000 mJ.

„Es ist 10.000 Mal wahrscheinlicher, dass eine Person vom Blitz getroffen wird, als dass sie durch eine HFO-1234yf-Entzündung aufgrund eines Zusammenstoßes verletzt wird.“ Honeywell (2008).

Diesbezüglich gibt es allerdings auch Quellen Halbach et al.(2008), die die Brennbarkeit stark kritisieren. Der Vizepräsident des Umweltbundesamtes in Deutschland, Thomas Holzmann, sagt, wenn sich das Kältemittel entzündet, entsteht Fluorwasserstoff und in Verbindung mit Wasser Flusssäure (HF). Herr Holzmann hält die Tests von Honeywell für unrealistisch.

Trotz der Kritik am R1234yf hat es heute den Anschein, dass dieses Kältemittel zukünftig die Standardlösung im PKW-Bereich sein wird.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Definition der Ölkonzentration, die Schallgeschwindigkeit des reinen Kältemittels sowie dessen Einflüsse behandelt. Desweiteren wird der Einfluss des Öles auf die Schallgeschwindigkeit und Verdampfungstemperatur erläutert.

2.1 Ölkonzentration in Kältemittel

Die Ölkonzentration in einem Öl/Kältemittel-Gemisch ist wie in (GL. 2-1) dargestellt definiert (Stalter et al.2007).

$$OCR = \frac{m_{\text{öl}}}{m_{\text{gesamt}}} = \frac{m_{\text{öl}}}{m_{\text{öl}} + m_{\text{Kältemittel}}} \quad (\text{GL. 2-1})$$

OCR ... Ölkonzentration

m_{öl} ... Masse des Öls

m_{Kältemittel} ... Masse des Kältemittels

m_{gesamt} ... gesamte Masse

In der Literatur Navarro et al.(1999) sind folgende Möglichkeiten aufgelistet, mit denen auf die Ölkonzentration geschlossen werden kann.

1. Probeentnahme und Abwiegen nach ASHRAE Standard 41.4-1996
2. Bestimmung der Dichte
3. Bestimmung der Lichtabsorption
4. Bestimmung der Viskosität
5. Bestimmung der Schallgeschwindigkeit

zu 1.: Dies ist die „einfachste“ Variante, jedoch kann bei dieser Methode nicht kontinuierlich gemessen werden. Dieses Verfahren wird als das genaueste beschrieben, allerdings auch als zeitaufwändigste. Es wird dabei in einem Entnahmestück mit bekanntem Gewicht eine Probe entnommen und verwogen. Anschließend wird das Kältemittel langsam verdampft, damit das Öl in der Probe zurückbleibt. Durch erneutes Abwiegen kann die Masse des Kältemittels und des Öls errechnet werden. Dadurch kann die Ölkonzentration bestimmt werden.

zu 2.: Ein U-Rohr wird mit dem Öl/Kältemittel-Gemisch durchströmt. Durch Ermittlung der Eigenfrequenz des Rohres kann auf die Dichte des Gemisches geschlossen werden. Mittels zusätzlicher Messung der Temperatur und des Druckes kann auf die Ölkonzentration geschlossen werden. Allerdings ist es nötig, den Zusammenhang zwischen Dichte, Temperatur und Öl zu kennen. Der Zusammenhang von Temperatur, Druck und der dritten Zustandsgröße, ist auch für die weiteren Möglichkeiten (3-5) Voraussetzung.

zu 3.: Bei dieser Methode wird die unterschiedliche Absorption des Lichtes als Maß für die Ölkonzentration verwendet.

zu 4.: Hierbei wird die Viskosität des Gemisches als Maß für die Konzentration herangezogen.

zu 5.: Die Schallgeschwindigkeit ist auch ein Maß für die Ölkonzentration. Mittels akustischem Signal, der Laufzeitlänge und dem Weg wird die Schallgeschwindigkeit ermittelt. Die Schallgeschwindigkeit hängt von Temperatur, Druck, verwendetem Kältemittel und Öl bzw. dessen Konzentration ab. Im Kapitel 2.3 werden die Einflüsse näher diskutiert. Laut Navarro de Andrade et al.(1999) ist diese Methode der beste Kompromiss zwischen Kosten und Messgenauigkeit.

In dieser Arbeit wird diese Methode für die Bestimmung der Ölkonzentration verwendet.

2.2 Öl im Kältemittel

Folgende Informationen bis excl. Kapitel 2.3 stammen von Stalter, et al., (2007) wenn nicht anders angeführt.

In R134a betriebene Klimaanlage werden meist Öle auf Polyalkylenglykol- kurz PAG und Ester-Basis verwendet Rieberer, et al., (2009). Die Einflüsse, die das Öl im Kältemittel verursacht, werden im Kapitel 5 behandelt. Abbildung 2-1 gibt eine Übersicht über die Menge an Kältemittel und Öl, die sich in verschiedenen PKW-Klimaanlagen befinden.

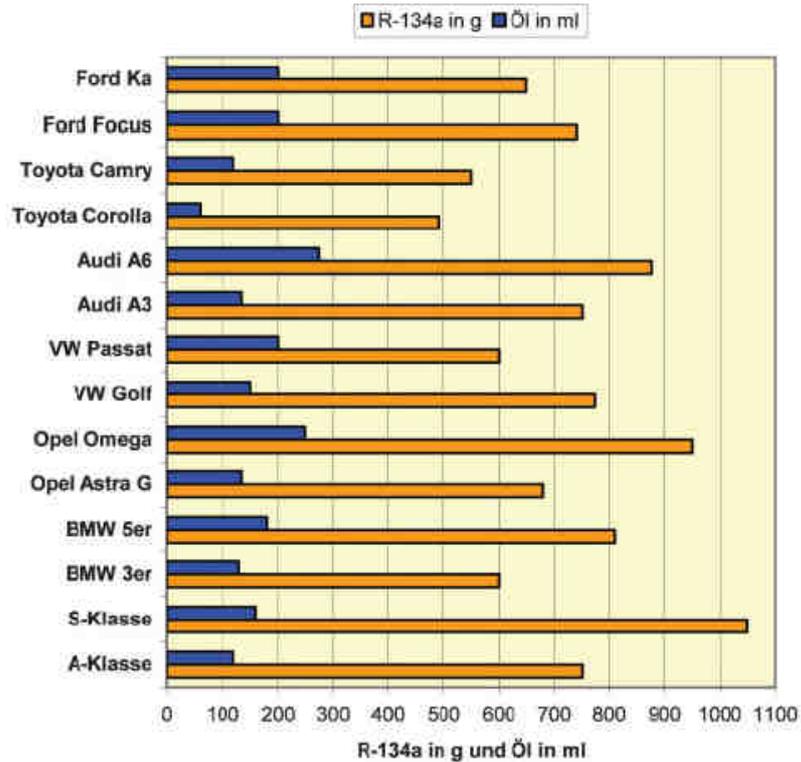


Abbildung 2-1 Kältemittel und Öl Mengen in PKW-Klimaanlagen

Quelle: Stalter et al. (2007)

Die Menge an Öl, die ein Verdichter in den Kreislauf mitbefördert, wird auch als Ölwurf bezeichnet.

Standardmäßig ist ein Ölabscheider nach dem Verdichter eingebaut, der das vom Verdichter „geworfene“ Öl noch vor dem Kondensator auffängt, und es wieder in den Verdichter leitet. Dieser senkt den OCR auf unter 1 % im zirkulierenden Kreislauf

Falls kein Ölabscheider vorhanden ist, beträgt der OCR zwischen 2,5 und 3,5 %. Dies hängt von der Drehzahl des Verdichters ab, wie es aus Abbildung 2-2 zu entnehmen ist.

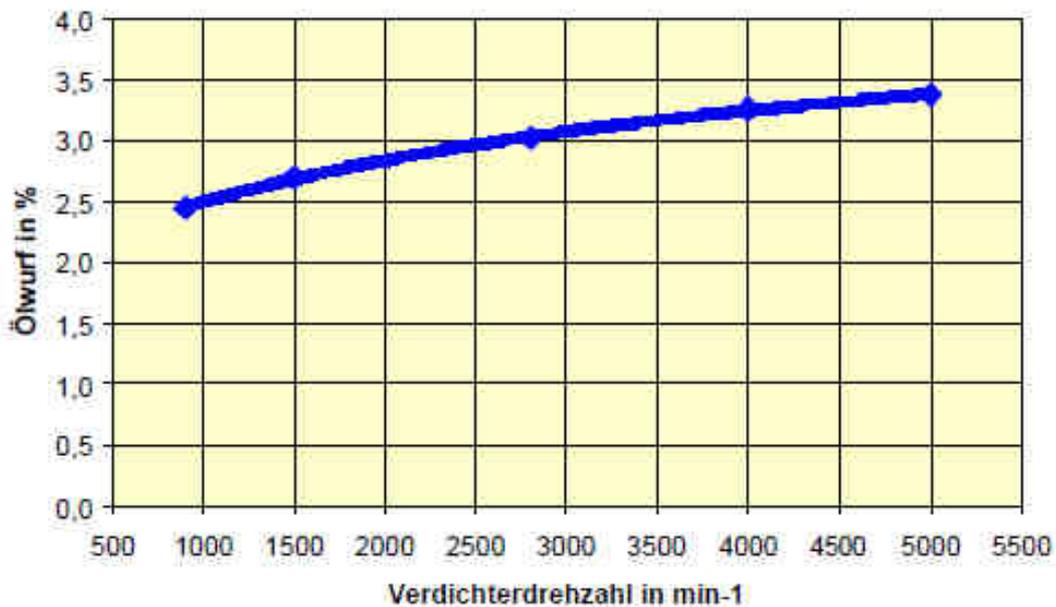


Abbildung 2-2 Ölwurf eines PKW-Klimaanlageverdichters

Quelle: Stalter et al. (2007)

2.3 Die Schallgeschwindigkeit

In diesem Kapitel wird die Schallgeschwindigkeit von Kältemittel und Ölen in Abhängigkeit von Druck, Temperatur und dessen Konzentration behandelt. Des Weiteren wird auch die Veränderung der Siedetemperatur eines Öl/Kältemittel-Gemisches betrachtet.

Die Schallgeschwindigkeit ist jene Größe, mit der sich Druckstöße im Medium fortbewegen. Es handelt sich dabei um eine Zustandsgröße. Das bedeutet, mit Hilfe einer zweiten Zustandsgröße sind alle anderen Zustandsgrößen bei einem Reinstoff berechenbar.

Handelt es sich um ein Stoffgemisch, kann mittels einer dritten Zustandsgröße auf die Konzentration geschlossen werden. Es wird allerdings vorausgesetzt, dass die Zusammenhänge zwischen den Zustandsgrößen und der Konzentration bekannt sind. Ist die Beziehung bekannt, kann z.B. durch Messen von Temperatur, Druck und Schallgeschwindigkeit auf die Konzentration des Gemisches geschlossen werden. Dies entspricht dem zuvor besprochenen Prinzip der Ölkonzentrationsmessung mittels Schallgeschwindigkeit.

Die Schallgeschwindigkeit in einem Kältemittel beträgt je nach Temperatur und Druck in etwa 250 - 650 m/s. Dabei wurde von Ahnefeld, et al., (1996) festgestellt, dass die Schallgeschwindigkeit ungefähr quadratisch mit der Temperatur und ungefähr linear mit dem Druck verhält

2.3.1 Schallgeschwindigkeitsänderung von R134a

Mittels Refprop 9.0 (2010) wurde Tabelle 2-1 erstellt. Es zeigt, wie groß die Schallgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Temperaturen und Drücken ist.

Tabelle 2-1 Schallgeschwindigkeit von R134a

Schallgeschwindigkeit in m/s Temperatur in °C	Druck in bar						
	5	10	15	20	30	50	100
0	623,4	627,7	631,8	635,9	644,0	659,4	694,8
10	576,5	581,3	585,9	590,5	599,4	616,4	655,0
20		534,2	539,5	544,6	554,6	573,5	615,7
30		486,1	492,1	498,0	509,4	530,6	576,9
40			443,3	450,2	463,2	487,3	538,6
50			392,1	400,3	415,7	443,5	500,6
60				347,1	366,1	398,8	463,0

Tabelle 2-2 zeigt, wie sich die Schallgeschwindigkeit bei R134a in der flüssigen Phase unter Einwirkung von Druck verändert, d.h. welchen durchschnittlichen Gradienten die Schallgeschwindigkeit zwischen unterschiedlichen Druckbereichen aufweist. Die Schallgeschwindigkeitserhöhung liegt in der Größenordnung zwischen 0,8 und 1,2 m/(s·bar) und erhöht sich mit steigendem Druck.

Tabelle 2-2 Druckeinfluss auf die Schallgeschwindigkeit von R134a

Schallgeschwindigkeit in m/(s · bar) Temperatur in °C	Druckbereich in bar					
	5-10	10-15	15-20	20-30	30-50	50-100
0	0,86	0,82	0,82	0,81	0,77	0,71
10	0,96	0,92	0,92	0,89	0,85	0,77
20		1,06	1,02	1,00	0,95	0,84
30		1,20	1,18	1,14	1,06	0,93
40			1,38	1,30	1,21	1,03
50			1,64	1,54	1,39	1,14
60				1,90	1,645	1,28

Tabelle 2-3 ist das Pendant zu Tabelle 2-2. Hier wird der Temperatureinfluss auf die Schallgeschwindigkeit dargestellt. Die Schallgeschwindigkeit verändert sich in der Größenordnung von 5,3 und 3,8 m/(s·K). Dabei sinkt mit größer werdendem Druck der Temperatureinfluss, jedoch nimmt der Betrag des Gradienten mit größer werdender Temperatur zu.

Tabelle 2-3 Temperatureinfluss auf die Schallgeschwindigkeit R134a

Schallgeschwindigkeitsänderung in m/(s · K) Temperaturbereich in °C	Druck in bar						
	5	10	15	20	30	50	100
0-10	-4,69	-4,64	-4,59	-4,54	-4,46	-4,3	-3,98
10-20		-4,71	-4,64	-4,59	-4,48	-4,29	-3,93
20-30		-4,81	-4,74	-4,66	-4,52	-4,29	-3,88
30-40			-4,88	-4,78	-4,62	-4,33	-3,83
40-50			-5,12	-4,99	-4,75	-4,38	-3,8
50-60				-5,32	-4,96	-4,47	-3,76

2.3.2 Schallgeschwindigkeitsänderung von R1234yf

Tabelle 2-4, Tabelle 2-5 und Tabelle 2-6 sind gleich wie die Tabellen unter 2.3.1 aufgebaut. Allerdings für das neue Kältemittel R1234yf. Die Einflüsse von Temperatur und Druck zeigen einen ähnlichen Verlauf. Jedoch liegt der absolute Wert für die Schallgeschwindigkeit bei R1234yf niedriger als im Vergleich zu R134a.

Tabelle 2-4 Schallgeschwindigkeit von R1234yf

Schallgeschwindigkeit in m/s Temperatur in °C	Druck in bar						
	5	10	15	20	30	50	100
0	561,1	566,0	570,9	575,8	585,1	603,0	643,6
10	516,9	522,4	527,9	533,2	543,6	563,2	607,0
20		478,1	484,3	490,3	501,9	523,5	571,1
30		432,5	439,6	446,5	459,6	483,8	535,7
40			393,3	401,4	416,6	444,0	500,9
50			344,4	354,3	372,3	403,8	466,7
60				302,2	325,4	363,0	433,1

Tabelle 2-5 Druckeinfluss auf die Schallgeschwindigkeit bei R1234yf

Schallgeschwindigkeit in m/(s·bar) Temperatur in °C	Druckbereich in bar					
	5-10	10-15	15-20	20-30	30-50	50-100
0	1,00	0,98	0,96	0,94	0,89	0,81
10	1,12	1,09	1,07	1,04	0,98	0,88
20		1,23	1,20	1,16	1,08	0,95
30		1,42	1,38	1,31	1,21	1,04
40			1,61	1,52	1,37	1,14
50			1,97	1,81	1,57	1,26
60				2,32	1,88	1,40

Tabelle 2-6 Temperatureinfluss auf die Schallgeschwindigkeit bei R1234yf

Schallgeschwindigkeitsänderung in $m/(s \cdot K)$	Druck in bar						
	5	10	15	20	30	50	100
Temperaturbereich in $^{\circ}C$							
0-10	-4,42	-4,36	-4,30	-4,25	-4,15	-3,98	-3,66
10-20		-4,44	-4,36	-4,30	-4,17	-3,97	-3,59
20-30		-4,56	-4,47	-4,38	-4,23	-3,97	-3,54
30-40			-4,62	-4,50	-4,30	-3,99	-3,48
40-50			-4,89	-4,71	-4,42	-4,01	-3,42
50-60				-5,21	-4,70	-4,09	-3,36

2.3.3 Zusammenfassung der Schallgeschwindigkeitseinflüsse

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Schallgeschwindigkeit bei Erhöhung der Temperatur um 1 K, sich in der Größenordnung von 4 m/s reduziert und durch die Erhöhung des Druckes von 1 bar um etwa 1 m/s zunimmt.

Die Daten sind bei R134a mit 1 % und R1234yf mit 0,5 % Unsicherheit in der flüssigen Phase von Refprop 9.0 (2010) angegeben.

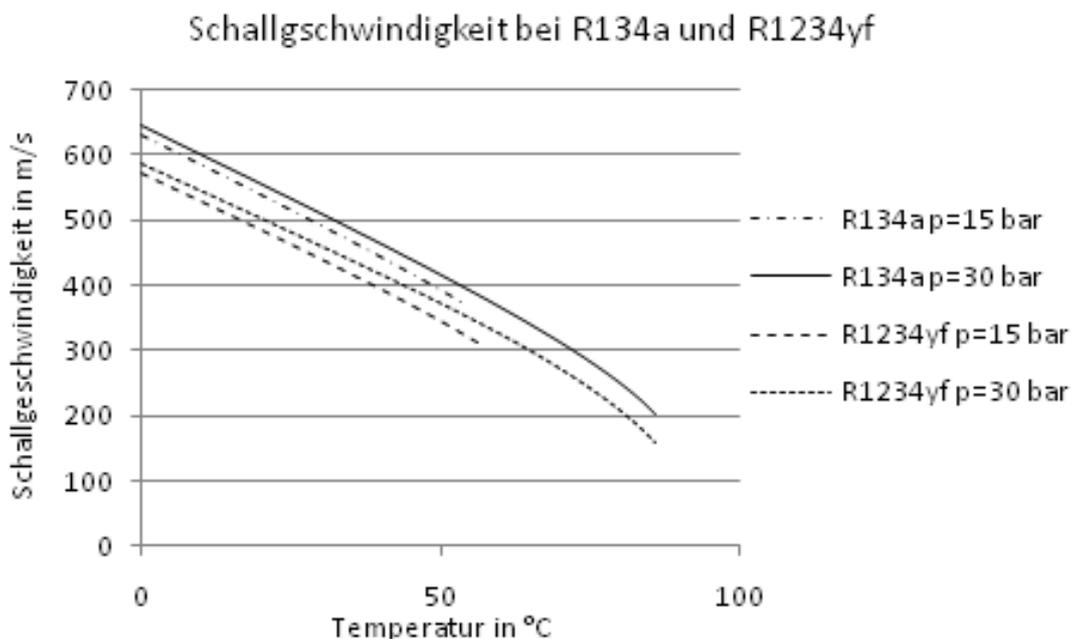


Abbildung 2-3 Verlauf der Schallgeschwindigkeiten von R134a und R1234yf

In Abbildung 2-3 ist die gesamte Veränderung der Schallgeschwindigkeit eines reinen R134a und reinen R1234yf dargestellt. Das Ende der Linien stellt zugleich das Ende der flüssigen Phase dar.

2.4 Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit durch Öle

Öle besitzen eine größere Schallgeschwindigkeit als das Kältemittel R134a bzw. R1234yf. Dies wurde bei der Messung von Lequenne (2008) gezeigt. Die Schallgeschwindigkeit von PAG ÖL bei 20°C liegt bei etwa 1350 m/s und sinkt mit steigender Temperatur.

In dem Bericht von Lequenne (2008) wird die Änderung der Geschwindigkeit mit der Temperatur beschrieben. Eine Änderung durch den Druck konnte allerdings nicht festgestellt werden.

Ahnefeld et al.(1996) berichteten keine Änderung der Schallgeschwindigkeit von POE Öl bei veränderlicher Temperatur. Allerdings wurde eine Veränderung der Schallgeschwindigkeit durch den Druck festgestellt.

In einer dritten Quelle Heimel et al.(1996), wird beschrieben, um wieviel sich die Schallgeschwindigkeit in Kohlenwasserstoffen durch Druck und Temperatur verändert. Kohlenwasserstoffe verändern die Schallgeschwindigkeit in der Größenordnung von -3,5 m/(s·K) bzw. mit +0,6 m/(s·bar).

Die tatsächliche Veränderung ist zwar für die Findung einer Ausgleichskurve wichtig, der Einfluss ist allerdings nur im Zusammenhang mit dem Kältemittel von Interesse. Der festgestellte Einfluss soll im Zuge der Vermessung festgestellt werden und wird unter 4.5.2 behandelt.

Steigerung der Schallgeschwindigkeit durch Ölkonzentrationen

Nach Ahnefeld et al. (1996) ergibt sich die theoretische Schallgeschwindigkeit in einem Zwei-Komponenten Gemisch, durch Addition der massenprozentuellen Schallgeschwindigkeiten beider Komponenten, siehe (GL. 2-2) und (GL. 2-3).

$$a = a_i \cdot \mu_i \quad (\text{GL. 2-2})$$

$$\mu_i = \frac{m_i}{m_{ges}} \quad (\text{GL. 2-3})$$

a...theoretische Schallgeschwindigkeit des Gemisches

a_i...Schallgeschwindigkeit einer Komponente

μ_i...Massenanteil einer Komponente am gesamten Gemisch

m_i...Masse einer Komponente

m_{ges}...Masse der Mischung

Die tatsächliche Schallgeschwindigkeit ist jedoch stets kleiner als die theoretisch errechnete. Ahnefeld et al.(1996) beschreiben die Abweichung zwischen der theoretischen und realen Schallgeschwindigkeit als linear mit steigender Ölkonzentration (siehe Abbildung 2-4).

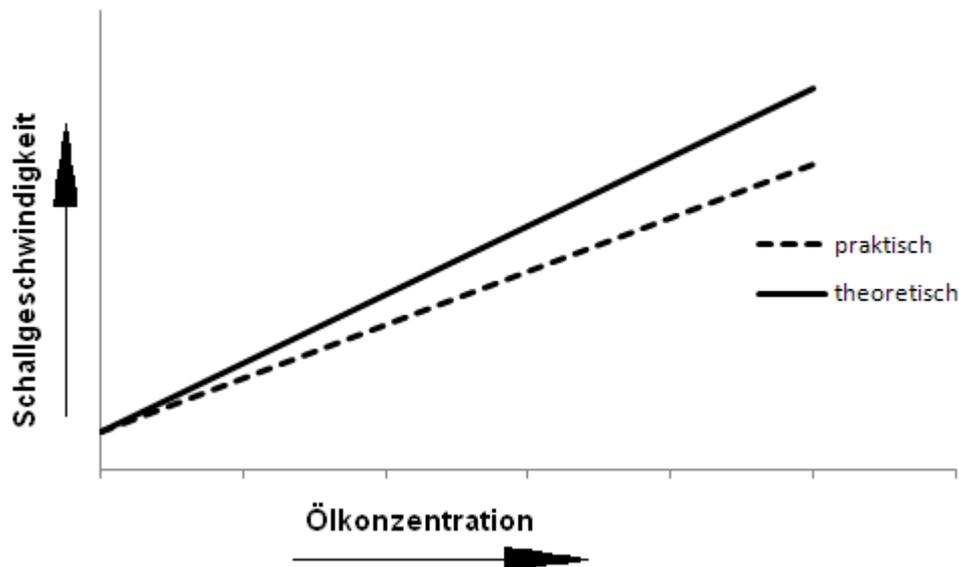


Abbildung 2-4 Systematischer Verlauf von a in Öl/Kältemittel-Gemisch

Mit diesen Informationen soll es möglich sein, geeignete Formen von Ausgleichkurven zu finden (vgl. Kapitel 4.5).

2.5 Einfluss der Ölkonzentration auf die Verdampfungstemperatur

Durch das im Kältemittel enthaltene Öl kann das Öl/Kältemittel-Gemisch als zeotrop betrachtet werden. Zeotrop bedeutet, dass die Siedetemperatur nicht nur vom Druck, sondern auch von den Massenanteilen des Gemisches abhängig ist. Durch den niedrigen Dampfdruck des Öles gegenüber dem Kältemittel kommt es allerdings erst bei höheren Ölkonzentrationen im Kältemittel zu einer merklichen Erhöhung der Siedetemperatur. In Thome et al. (1995) wird ein Berechnungsvorgang angeführt (siehe (GL. 2-4) bis (GL. 2-7)), bei dem die Veränderung der Siedetemperatur durch die Zunahme der Ölkonzentration berechnet wird. Diese Form der Funktion besitzt bis zu einer Ölkonzentration von 70 % Gültigkeit.

$$T_{s,M} = \frac{A(OCR)}{\ln(p_{s,M}) - B(OCR)} \quad \text{in K} \quad (\text{GL. 2-4})$$

$p_{s,m}$ in MPa OCR in %

$$OCR = \frac{\dot{m}_{\dot{\alpha}}}{\dot{m}_{\text{Kältemittel flüssig}} + \dot{m}_{\dot{\alpha}}} \quad (\text{GL. 2-5})$$

2. Grundlagen

$$A(OCR_{\text{lokal}}) = a_0 + a_1 \cdot OCR_{\text{lokal}} + a_2 \cdot OCR_{\text{lokal}}^3 + a_3 \cdot OCR_{\text{lokal}}^5 + a_4 \cdot OCR_{\text{lokal}}^7 \quad (\text{GL. 2-6})$$

$$B(OCR_{\text{lokal}}) = b_0 + b_1 \cdot OCR_{\text{lokal}} + b_2 \cdot OCR_{\text{lokal}}^3 + b_3 \cdot OCR_{\text{lokal}}^5 + b_4 \cdot OCR_{\text{lokal}}^7 \quad (\text{GL. 2-7})$$

Die lokale Ölkonzentration (OCR_{lokal}) kann an jeder Stelle im Kreislauf bestimmt werden. Wie aus (GL. 2-5) hervorgeht ist dafür der Ölmassestrom und der flüssige Anteil des Kältemittelmassenstrom von Bedeutung. Der Ölmassestrom bleibt im Kreislauf unverändert, allerdings verändert sich der Massestrom des flüssigen Kältemittels im Verlauf des Kreislaufes.

An einer Stelle bei der sich weniger flüssiges Kältemittel befindet (z.B. am Ende des Verdampfers) ist die lokale Ölkonzentration somit höher, als am Anfang des Verdampfers wo eine größere Menge an flüssigen Kältemittel vorliegt. Somit steigt die lokale Ölkonzentration im Verdampfer über der Verdampferlänge.

OCR_{lokal} vs. OCR

Der OCR ist die globale Betrachtung des Messstandes. Es wird für die Berechnung die gesamten Massen vom Kältemittel und vom Öl verwendet. Für die Berechnung von OCR_{lokal} wird lediglich die Konzentration an einer Stelle berücksichtigt.

Tabelle 2-7 Koeffizienten für Siedetemperatur von R22 und AB Öl

Koeffizienten für R22 und AB-Alkyl Benzen Öl			
a_0	-2394,5	b_0	8,0736
a_1	182,52	b_1	-0,72212
a_2	-724,21	b_2	2,3914
a_3	3868	b_3	-13,779
a_4	-5268,9	b_4	17,066

Es wird in Thome et al. (1995) beschrieben, dass die Formel (GL. 2-4) relativ einfach für andere Öl/Kältemittel-Gemisch adaptiert werden kann. Die Werte a_0 und b_0 sind nur vom verwendeten Kältemittel abhängig, die restlichen Konstanten vom verwendeten Öl.

Die Werte a_0 und b_0 können mit einem Stoffwertprogramm selbst bestimmt werden, indem knapp über und unter dem gesuchten Punkt Verdampfungstemperatur und Verdampfungsdruck des reinen Kältemittels bestimmt werden. Dies wird in den (GL. 2-10) und (GL. 2-11) dargestellt. Dadurch entstehen zwei Gleichungen mit zwei Unbekannten, und die Koeffizienten a_0 und b_0 können zu diesem Druck bestimmt werden. Es muss allerdings der Druck in MPa und die Temperatur in K eingesetzt werden.

Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass sich die Koeffizienten a_0 und b_0 mit dem Sättigungsdruck verändern. Werden für ein Kältemittel mehrere Punkte bestimmt, kann eine Ausgleichskurve erstellt werden, welche die Veränderung der Koeffizienten von a_0 und b_0 über den Dampfdruck beschreibt.

2. Grundlagen

Dies wurde von Scheiber, (2001) für R134a mit einer Ausgleichskurve zweiter Ordnung durchgeführt. Aus (GL. 2-6) und (GL. 2-7) folgen für R134a und einem beliebigen Öl für geringe Konzentrationen die (GL. 2-8) und (GL. 2-9).

In Thome et al. (1995) ist geschrieben, dass die angeführten Koeffizienten $a_1 - a_4$ und $b_1 - b_4$ (siehe Tabelle 2-7) auch für andere Öle bei geringen Ölkonzentrationen verwendet werden können. Durch den viel geringeren Dampfdruck des Öls gegenüber dem Kältemittel kommt der Einfluss erst bei Konzentrationen über 50 % zu tragen.

$$A(R134a, p, OCR_{lokal}) = -3,5011 \cdot p^2 + 45,717 \cdot p - 2808,1 + 182,52 \cdot OCR_{lokal} - 724,21 \cdot OCR_{lokal}^3 + 3868,5 \cdot OCR_{lokal}^5 - 5268,9 \cdot OCR_{lokal}^7 \quad (GL. 2-8)$$

$$B(R134a, p, OCR_{lokal}) = 0,0147 \cdot p^2 - 0,1798 \cdot p + 9,0735 - 0,72212 \cdot OCR_{lokal} - 2,3914 \cdot OCR_{lokal}^3 - 13,779 \cdot OCR_{lokal}^5 + 17,066 \cdot OCR_{lokal}^7 \quad (GL. 2-9)$$

Die Erstellung solch einer Funktion für ein anderes Kältemittel und einem anderen Temperaturbereiche sind ist im nächsten Schritt erläutert.

Da für diesen Messstand die Ausgleichskurven von (GL. 2-8) und (GL. 2-9) nicht den gesamten Bereich abdecken bzw. für R1234yf noch gar nicht erstellt worden sind, werden diese für R134a und R1234yf neu errechnet.

Die Ausgleichskurven sollen den Bereich zwischen 0 und 60°C abdecken. Mittels Refprop 9.0 (2010) kann eine Vielzahl an Punkten erstellt werden, mit denen eine Ausgleichskurve erstellt wird. Dabei wurde ersichtlich, dass ein Polynom 4ten Grades eine viel bessere Ausgleichskurve bietet als ein Polynom zweiter Ordnung.

Tabelle 2-8 zeigt einen Auszug für die Berechnung der Koeffizienten $A(OCR_{lokal=0\%})$ und $B(OCR_{lokal=0\%})$ für den Auslegungspunkt von 0 °C.

Die Koeffizienten von a_1-a_4 und $b_1 - b_4$ fallen bei reinem Kältemittel je aus der (GL. 2-6) und (GL. 2-7) . Somit gilt für $OCR=0\%$

$$A(OCR_{lokal=0\%})=a_0$$

$$B(OCR_{lokal=0\%})=b_0$$

Tabelle 2-8 Auszug aus Berechnung der Koeffizienten a_0 und b_0 für R134a

Bezeichnung	T in °C	ps in MPa	T in K	$A(OCR_{lokal=0\%})$	$B(OCR_{lokal=0\%})$
P_x	0	0,29280	273,15	-2703,28	8,67
P_1	-0,001	0,29279	273,15		
P_2	0,001	0,29281	273,15		

P_x =Punkt an gewünschter Temperatur T_x

P_1 =Punkt mit Temperatur etwas unter T_x

P_2 =Punkt mit Temperatur etwas über T_x

2. Grundlagen

$$A_{(\text{OCRI}_{\text{lokal}}=0\%;T=T_x)} = T_1 \cdot (\text{LN}(p_{s1}) - B_{(\text{OCRI}_{\text{lokal}}=0\%;T=T_x)}) \quad (\text{GL. 2-10})$$

$$B_{(\text{OCRI}_{\text{lokal}}=0\%;T=T_x)} = \frac{T_1 \cdot \text{LN}(p_{s1}) - T_2 \cdot \text{LN}(p_{s2})}{T_1 - T_2} \quad (\text{GL. 2-11})$$

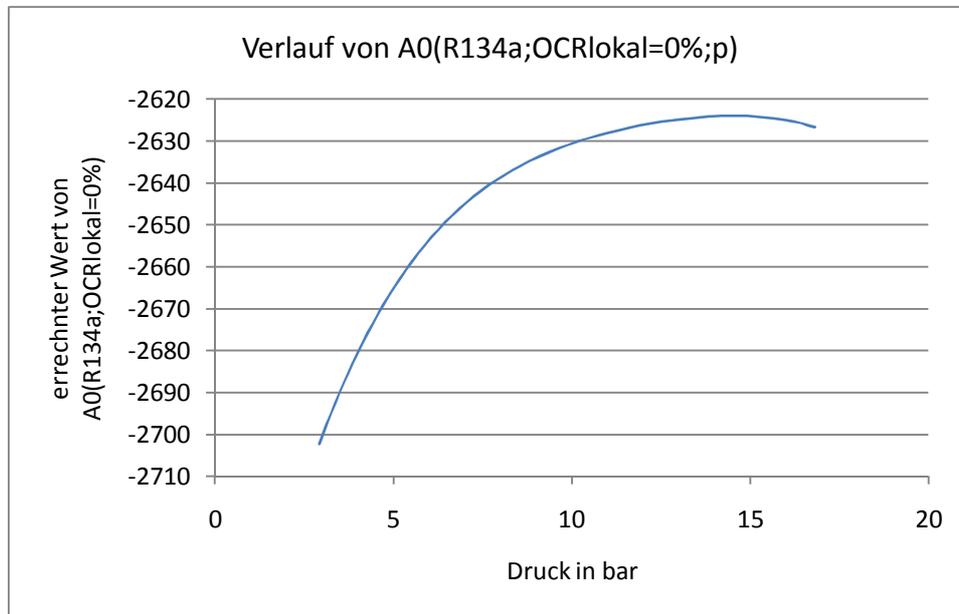


Abbildung 2-5 Verlauf des Koeffizienten $A(\text{R134a};\text{OCRI}_{\text{lokal}}=0\%;p)$

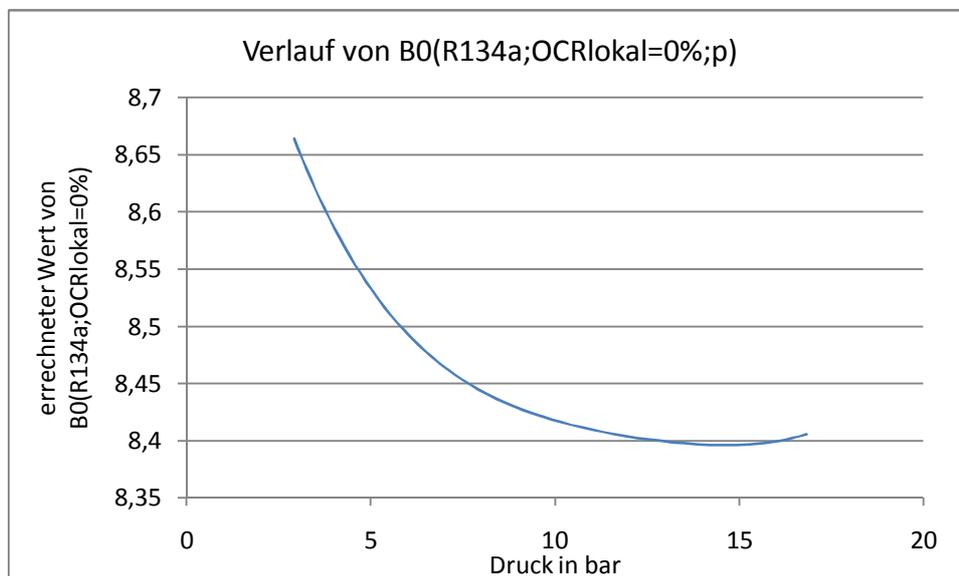


Abbildung 2-6 Verlauf des Koeffizienten $B(\text{R134a};\text{OCRI}_{\text{lokal}}=0\%;p)$

$$a_0(p) = -2800 + 454,5 \cdot p - 479,6 \cdot p^2 + 243,61 \cdot p^3 - 49,18 \cdot p^4 \quad (\text{GL. 2-12})$$

$$b_0(p) = 9,0218 - 1,6812 \cdot p + 1,8349 \cdot p^2 - 0,9517 \cdot p^3 + 0,1935 \cdot p^4 \quad (\text{GL. 2-13})$$

2. Grundlagen

Die Gleichungen (GL. 2-12) und (GL. 2-13) stellen die Ausgleichsfunktion für die Koeffizienten von a_0 und b_0 dar. Diese gelten für reines R134a von 0-60°C. Mit den Ausgleichsfunktionen von a_0 und b_0 ergeben sich die Ausgleichskurven für R134a und R1234yf mit einem beliebigen Öl bis zu einer lokalen Ölkonzentration von 50 %. Diese sind in (GL. 2-14) bis (GL. 2-17) angeführt.

Für R134a lauten die Ausgleichsfunktionen somit:

$$\begin{aligned} A(p, OCR_{\text{lokal}}) &= -2800 + 454,5 \cdot p - 479,6 \cdot p^2 + 243,61 \cdot p^3 - 49,18 \\ &\cdot p^4 + 182,52 \cdot OCR_{\text{lokal}} - 724,21 \cdot OCR_{\text{lokal}}^3 + 3868,5 \\ &\cdot OCR_{\text{lokal}}^5 - 5268,9 \cdot OCR_{\text{lokal}}^7 \end{aligned} \quad (\text{GL. 2-14})$$

$$\begin{aligned} B(p, OCR_{\text{lokal}}) &= 9,0218 - 1,6812 \cdot p + 1,8349 \cdot p^2 - 0,9517 \cdot p^3 \\ &+ 0,1935 \cdot p^4 - 0,72212 \cdot OCR_{\text{lokal}} + 2,3914 \cdot OCR_{\text{lokal}}^3 \\ &- 13,779 \cdot OCR_{\text{lokal}}^5 + 17,066 \cdot OCR_{\text{lokal}}^7 \end{aligned} \quad (\text{GL. 2-15})$$

Für R1234yf lauten die Ausgleichskurven:

$$\begin{aligned} A(p, OCR_{\text{lokal}}) &= -2608,6 + 355,657 \cdot p - 391,04 \cdot p^2 + 195,09 \cdot p^3 \\ &- 39,166 \cdot p^4 + 182,52 \cdot OCR_{\text{lokal}} - 724,21 \cdot OCR_{\text{lokal}}^3 \\ &+ 3868,5 \cdot OCR_{\text{lokal}}^5 - 5268,9 \cdot OCR_{\text{lokal}}^7 \end{aligned} \quad (\text{GL. 2-16})$$

$$\begin{aligned} B(p, OCR_{\text{lokal}}) &= 8,397 - 1,318 \cdot p + 1,497 \cdot p^2 - 0,768 \cdot p^3 + 0,1558 \\ &\cdot p^4 - 0,72212 \cdot OCR_{\text{lokal}} + 2,3914 \cdot OCR_{\text{lokal}}^3 - 13,779 \\ &\cdot OCR_{\text{lokal}}^5 + 17,066 \cdot OCR_{\text{lokal}}^7 \end{aligned} \quad (\text{GL. 2-17})$$

Ergebnisse durch Einsetzen in (GL. 2-4) sind in Tabelle 2-9 bzw. Tabelle 2-10 dargestellt.

Abbildung 2-7 zeigt die Veränderung der Verdampfungstemperatur durch den Einfluss des Öles bei 3 bar. Es zeigt sich, dass die Verdampfungstemperatur sich erst bei größeren Ölkonzentrationen merklich erhöht.

Da die Ölkonzentration in einem Kältemittelkreislauf sich unter 10 % befindet, scheint die Erhöhung der Verdampfungstemperatur auf den ersten Blick nicht von Bedeutung zu sein. Allerdings kommen hohe lokale Ölkonzentrationen am Ende des Verdampfers zustande, wenn ein Großteil des Kältemittels bereits verdampft ist und das Öl flüssig bleibt. Demzufolge nimmt die lokale Ölkonzentration rapide am Ende des Verdampfers zu, wodurch sich die Verdampfungstemperatur erhöht.

2. Grundlagen

Tabelle 2-9 Zunahme der Verdampfungstemperatur bei R134a durch OCR

Verdampfungstemperatur in °C p in bar	OCR _{lokal}					
	0*	0	0,2	0,3	0,4	0,5
3	0,67	0,68	0,74	0,78	0,81	0,84
4	8,93	8,92	9,01	9,06	9,10	9,15
5	15,73	15,73	15,84	15,90	15,96	16,02
6	21,57	21,58	21,71	21,78	21,85	21,92
7	26,71	26,72	26,88	26,96	27,03	27,11
8	31,33	31,33	31,51	31,59	31,68	31,77
9	35,53	35,53	35,72	35,81	35,91	36,00
10	39,39	39,38	39,59	39,69	39,79	39,90
11	42,97	42,96	43,18	43,29	43,40	43,51
12	46,31	46,31	46,54	46,66	46,78	46,89
13	49,46	49,46	49,70	49,83	49,95	50,08
14	52,42	52,43	52,69	52,83	52,96	53,09
15	55,23	55,25	55,52	55,66	55,80	55,93
16	57,91	57,91	58,20	58,34	58,48	58,62
17	60,46	60,41	60,71	60,86	61,01	61,15
18	62,90	62,74	63,05	63,20	63,35	63,51
19	65,23	64,87	65,19	65,35	65,50	65,66
20	67,48	66,77	67,10	67,26	67,42	67,58

*Verdampfungstemperatur reines Kältemittel aus Refprop 9.0 (2010)

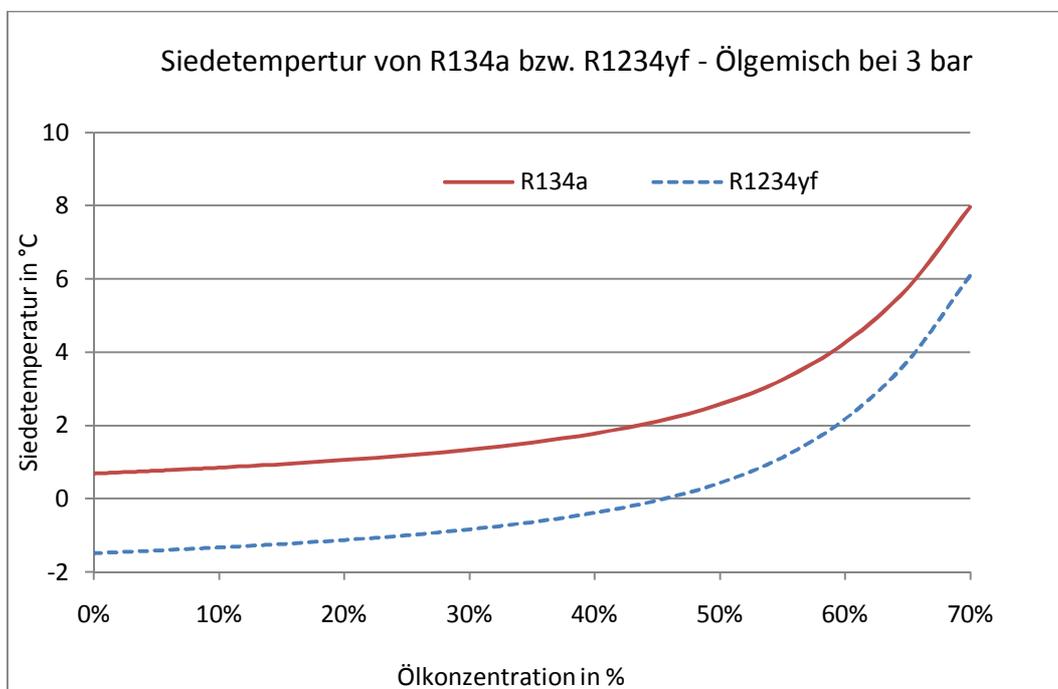


Abbildung 2-7 Siedetemperatur von R134a bzw. R1234yf -Ölgemisch

Tabelle 2-10 Zunahme der Verdampfungstemperatur von R1234yf durch OCR

Verdampfungstemperatur in °C p in bar	OCR _{lokal}					
	0*	0	0,2	0,3	0,4	0,5
3	-1,51	0,68	1,05	1,34	1,78	2,57
4	7,17	8,92	9,42	9,76	10,28	11,21
5	14,33	15,73	16,34	16,73	17,32	18,37
6	20,48	21,58	22,28	22,73	23,37	24,52
7	25,90	26,72	27,52	28,00	28,71	29,95
8	30,77	31,33	32,22	32,74	33,49	34,82
9	35,20	35,53	36,49	37,04	37,84	39,26
10	39,28	39,38	40,42	41,01	41,85	43,34
11	43,07	42,96	44,06	44,68	45,57	47,13
12	46,60	46,31	47,48	48,13	49,05	50,68
13	49,93	49,46	50,69	51,37	52,33	54,02
14	53,06	52,43	53,73	54,43	55,43	57,18
15	56,03	55,25	56,60	57,33	58,37	60,17
16	58,86	57,91	59,32	60,07	61,14	63,00
17	61,55	60,41	61,87	62,65	63,74	65,66
18	64,13	62,74	64,25	65,04	66,17	68,13
19	66,60	64,87	66,42	67,23	68,38	70,38
20	68,97	66,77	68,36	69,19	70,35	72,39

*Verdampfungstemperatur reines Kältemittel aus Refprop 9.0 (2010)

2.6 Entmischung von Öl in Kältemittel

Wie bei den Eigenschaften von Kältemittel im Kapitel 1.5 kurz erwähnt, ist eine gute Mischung des Öles im Kältemittel wichtig. Dies ist notwendig, damit sich das Öl nicht an einer Stelle im Kältekreislauf ansammeln kann.

Die Mischbarkeit von Ölen hängt dabei von Ölkonzentration, Temperatur und Druck ab.

Ein dafür angefertigtes Diagramm liefert dabei den Betreiber die Informationen, ab wann es zur Entmischung kommt. Ein solches Diagramm für die durchgeführte Messung findet sich im Kapitel 4.6.

3 Messstand

In diesem Kapitel wird der Aufbau des Messstandes erläutert. Es werden die einzelnen Bauteile sowie die verwendeten Messgeräte erklärt. Weiters wird in diesem Kapitel die notwendigen Vorbereitungen für die Messung, sowie deren Ablauf beschrieben. Alle Komponenten wurden auf einen Druck von 30 bar ausgelegt. Einzig die Öldosierung hält diesen Druck nicht stand. Dies ist allerdings nicht von Bedeutung und wird im Kapitel 3.1.6 näher erklärt.

In Abbildung 3-1 ist der Versuchstand schematisch dargestellt und soll den Leser einen Überblick über den Versuchstand liefern. In Abbildung 3-2 befindet sich ein Bild des errichteten Messstandes mit der Beschriftung der wesentlichen Komponenten.

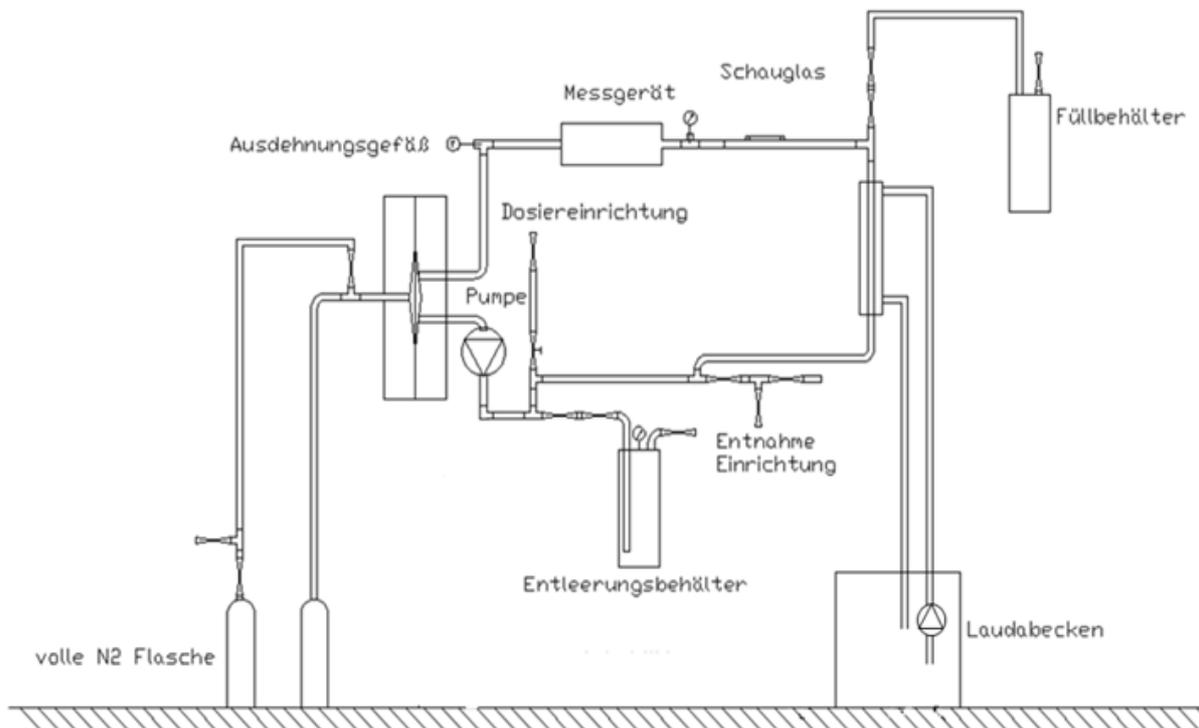


Abbildung 3-1 Skizze des Messstandes

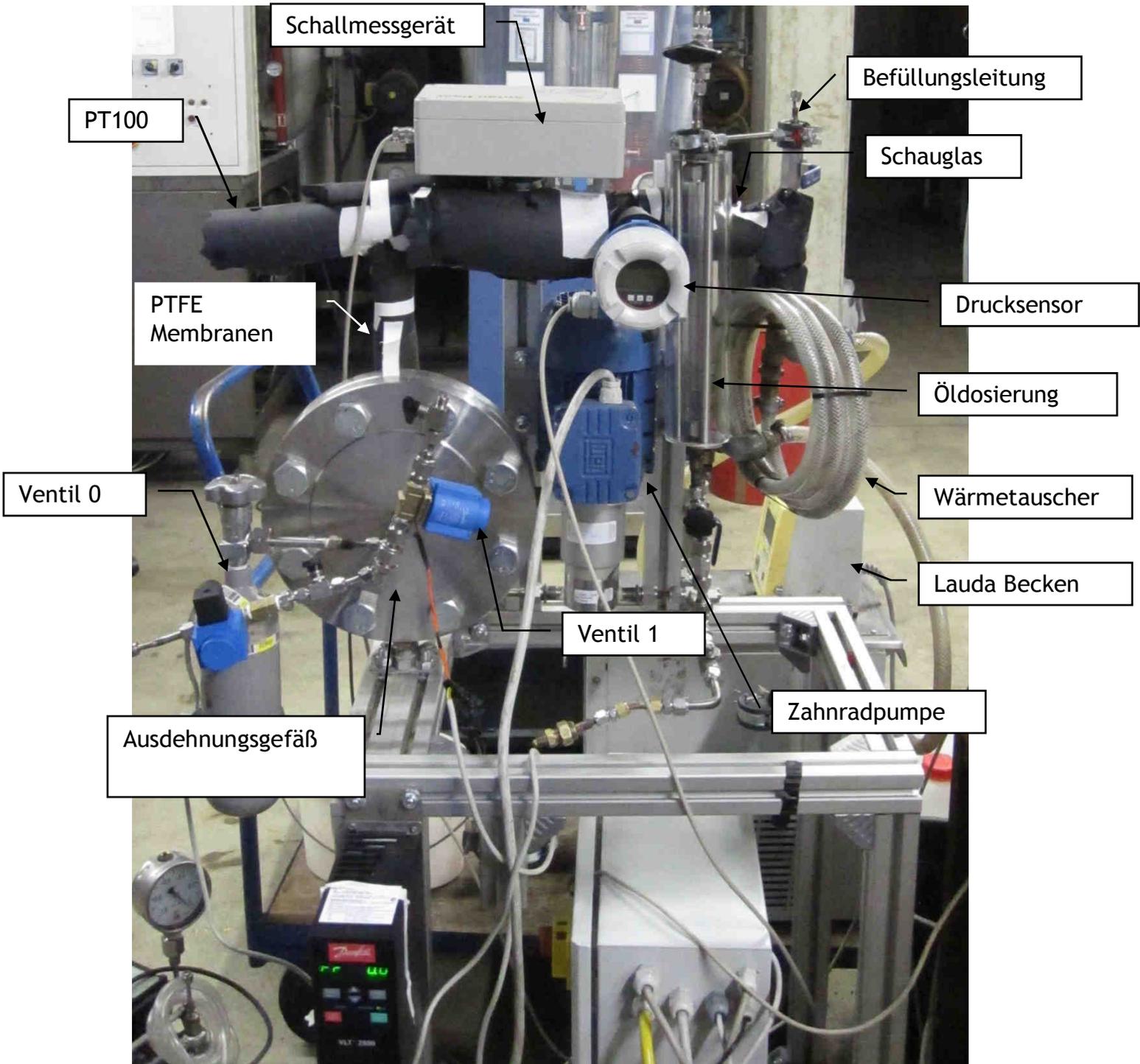


Abbildung 3-2 Foto Messstand

3.1 Bauteile

3.1.1 Zahnradpumpe

Es handelt sich um eine Zahnradpumpe Magnetic Drive Gear Pump GC M35 der Fa. Micropump mit der genauen Bezeichnung: GC-M35.JF5S6. Die Pumpe ist hermetisch dicht und kann eine Drucksteigerung von 8,7 bar erzeugen. Der Systemdruck darf für die Pumpe maximal 103 bar betragen. Die Pumpenkennlinie für Wasser (siehe Abbildung 3-3) wird vom Hersteller Micropump (www.micropump.com) angegeben.

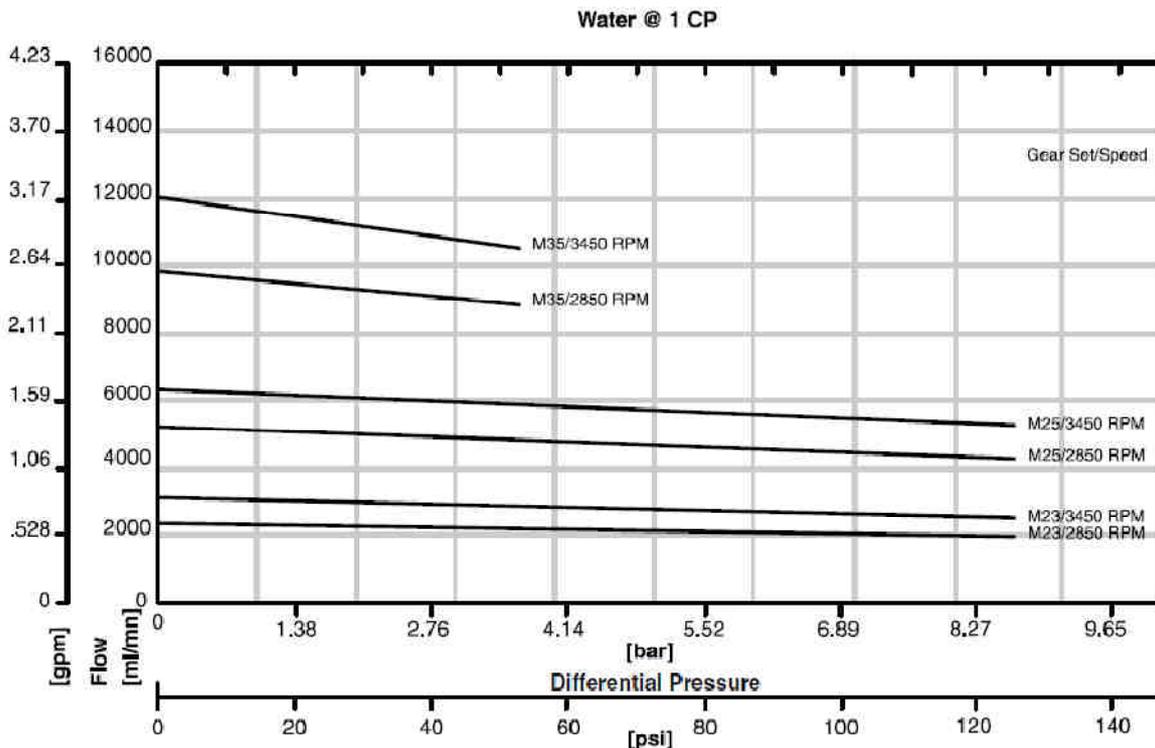


Abbildung 3-3 Pumpenkennlinie

3.1.2 Temperierung des Messstandes

Für die Temperierung des Öl/Kältemittel-Gemisches wird ein Kryostat der Fa. Lauda verwendet. Es handelt sich dabei um Ecoline RE 210. Dieses Wasserbecken (im Weiteren mit „Lauda Becken“ bezeichnet) kann kühlen sowie heizen.

Mit diesem ist es möglich, über eine serielle Schnittstelle die Temperatur vorzugeben, auf die das Becken regeln soll. Allerdings kann auch ein Programmablauf direkt am Gerät eingegeben werden. Dabei kann bestimmt werden, für welche Zeitdauern auf bestimmte Temperaturen geregelt wird. Die zweite Funktion wurde bei dieser Arbeit verwendet.

3.1.3 Druckbegrenzung (Sicherheitsabschaltung)

Ein Sicherheitsventil der Fa. Lorch mit der Bezeichnung D10CS-30 bar befand sich unmittelbar nach der Pumpe und öffnet bei 30 bar absolut. Die Öffnung des Sicherheitsventil war mit dem Sicherheitsbehälter durch ein Rohr mit $D=12 \times 1,5$ mm verbunden. Da es allerdings mit der Dichtheit des Sicherheitsventils Probleme gegeben hat, wurde es ausgebaut.

Der Druck wurde in der Regel bei dieser Arbeit durch Anwesenheit einer Person bei eingeschaltetem Messstand überwacht.

Im späteren Verlauf durch automatisches Abschalten der Beheizung des Lauda Beckens gewährleistet. Dies wurde realisiert, indem der Analogausgang vom Drucksensor durch ein Relais geleitet wurde. Wird im Messstand ein Druck von 30 bar erreicht, gibt der Drucksensor 20 mA aus. Bei dieser Strommenge wird so das Relais geschaltet, was eine Unterbrechung des Stromes für die Beheizung des Messstandes zur Folge hat.

3.1.4 Ausdehnungsgefäß

Das Ausdehnungsgefäß besteht aus zwei mechanisch bearbeiteten Blindflanschen (DN125 und PN64), die zusammengeschraubt wurden. Auf der Innenseite befindet sich ein Kegel, der einerseits das Volumen zur Ausdehnung bei steigender Temperatur zur Verfügung stellt und andererseits die Einstellung des Systemdrucks ermöglicht.

Der Druck wird wie folgt eingestellt. Zwischen den zwei Flanschen befinden sich zwei 1 mm starke PTFE Membranen. Auf der einen Seite befindet sich das Öl/Kältemittel-Gemisch und auf der anderen Seite liegt Stickstoff an. Soll der Druck im Messstand erhöht werden, wird der Druck auf der Stickstoffseite durch die Stickstoffflasche erhöht. Der Druck wird über die Membranen an das Kältemittel übertragen. Auch wenn im Prüfstand ein Höchstdruck von 30 bar wirkte, wurde bewusst ein Flansch höherer Druckklasse gewählt, um die Schwächung durch die eingedrehten Kegel auf der Flanschinnenseite zu kompensieren. Die Flansche sind mit 8 Stück M24 8.8 Schrauben gesichert. Abbildung 3-4 gibt den prinzipiellen Aufbau des Ausdehnungsgefäßes wieder.

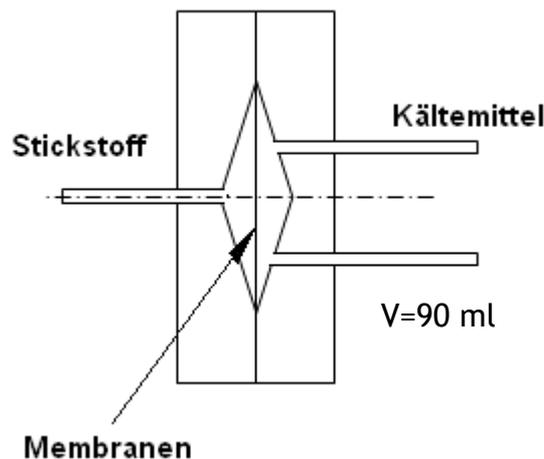


Abbildung 3-4 Ausdehnungsgefäß

3.1.5 Entleerungsbehälter

Der Behälter besteht aus zwei ineinander geschobenen Rohren. Eine Skizze dieses Behälters ist in Abbildung 3-5 dargestellt. Im inneren Rohr befindet sich das Kältemittel. Zwischen dem inneren und dem äußeren Rohr befindet sich ein Hohlraum, der mit Wasser durchspült werden kann. Mit diesem Wasser kann der Entleerungsbehälter temperiert werden.

Dadurch wird der Druck im Messstand bei der Entleerung durch die Dampftemperatur im Entleerungsbehälter festgelegt. Wird der Behälter gekühlt, kondensiert das Kältemittel im Entleerungsbehälter und gibt somit den Druck im restlichen System vor. Durch eine tiefere Temperatur im Entleerungsbehälter als in der Umgebung liegt das Kältemittel nur gasförmig im Messstand vor. Im Behälter hingegen liegt es flüssig und gasförmig vor. Dadurch kann der Ausstoß bei der Entleerung an die Umgebung klein gehalten werden.

Die Abmessungen für das innere Rohr betragen: 33,7x3x700 mm.

Die Deckel haben eine Stärke von 3 mm. Laut Berechnungen nach dem AD Merkblätter B5 benötigen die Deckel inkl. Schwächung durch die Rohre eine Stärke von ca. 2,7 mm bei einem Innendruck von 30 bar absolut und einer 1,5-fachen Sicherheit.

Auch wurde darauf geachtet, dass bei der Rückfüllung des Kältemittels das Öl im Entleerungsbehälter zurückbleibt. Die Auslegung des Ölabscheiders für kontinuierliche Strömung erfolgte dabei nach Stenhede et al.(1999). Je langsamer die Rückfüllung von statten geht, desto niedriger kann der Behälter ausgeführt werden. Die Leitung, welche das Gemisch in den Behälter leitet, wurde bis zum Boden geführt.

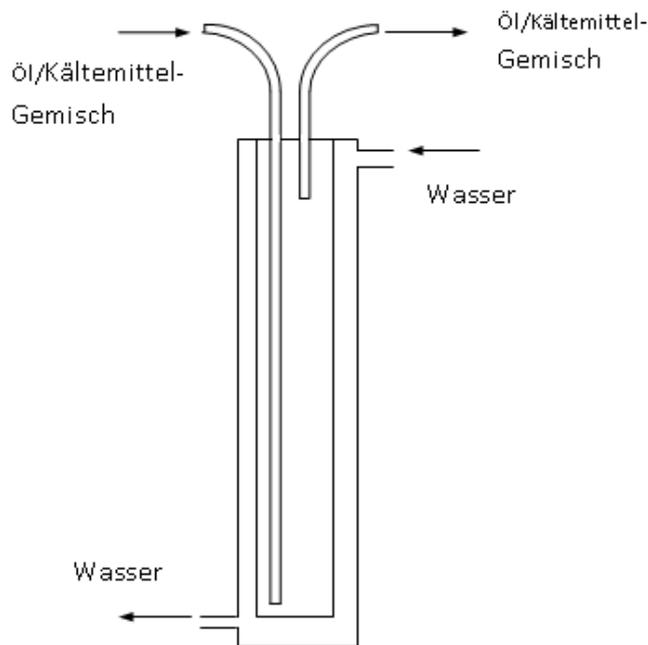


Abbildung 3-5 Entleerungsbehälter

In der besagten Quelle wurde darauf hingewiesen, dass dies die Verneblung reduziert, allerdings den Flüssigkeitspegel zum Schwanken bringt und dadurch eine Regelung nach dem Pegel erschwert. Da hier allerdings nicht nach dem Pegel geregelt wird, wurde die Zuflussleitung bis nach unten geführt, um den positiven Effekt nutzen zu können.

3.1.6 Öldosierung

Für die Öldosierung wird ein Glasrohr mit den Abmessungen 15 x 2,5 x 300mm verwendet. Die Fa. „Gaßner Glastechnik“ gab am Telefon an, dass dieses Glasrohr einen Druck von 28 bar aushalten sollte, dafür jedoch keine Garantie übernommen werden kann. Für das Glasrohr wurde eine spezielle Vorrichtung gebaut, an der vorne ein Nadelventil und hinten ein Kugelhahn auf die Vorrichtung montiert wurde.

An dem Glasrohr befindet sich eine Skala, mit einer Auflösung von 0,05ml. Mittels dieser Skala wird kontrolliert, wie viel Öl in den Messstand gegeben wurde. 1 ml Öl entsprechen daher 12,7 mm auf der Skala. Durch Anschließen der Stickstoffflasche am anderen Ende wird im Glasrohr ein Druck aufgebaut, welcher höher als der im Messsystem ist. Durch Öffnen des Nadelventils wird Öl in den Kreislauf gepresst. Nach Erreichen der gewünschten Konzentration wird das Ventil wieder geschlossen. Die Pumpe sorgt für eine gleichmäßige Verteilung des Öls im System.

3.1.7 Befüllungsbehälter

Der Befüllungsbehälter hat die gleiche Größe wie der Sicherheitsbehälter und der Entleerungsbehälter. Bei diesem Behälter wurde darauf geachtet, dass das Gewicht des gesamten Behälters unter 6 kg bleibt. Damit ist es möglich, den kompletten Messstand zu füllen und gleichzeitig die Füllmenge im Messstand mit der

vorhandenen Waage zu ermitteln. Bei der Waage handelt es sich um das Gerät GX-6100-EC der Fa. A&D Instruments LTD.

Dies wird erreicht, indem der Befüllungsbehälter vor und nach der Befüllung abgewogen wird. Die Differenz befindet sich fast zur Gänze im Messstand. Das Kältemittel, welches sich in der Verbindungsleitung zwischen den zwei Ventilen befindet, wird beim Demontieren des Befüllungsbehälters in die Umgebung abgelassen. Dabei handelt es sich um ein Volumen von ca. 1,6 ml.

Dies verfälscht beim Abwiegen den Wert, mit dessen die Füllmenge bestimmt wird minimal. Durch Erhitzen dieses Teilstückes kann jedoch die an die Umgebung abgegebene Menge minimiert werden. Ist dieses Teilstück mit gasförmigen R134a bei 50°C 5,7 bar vor (Dampfdruck bei 20°C) befüllt, entweicht eine Menge von ca. 0,4 g. Somit geht lediglich jene Menge an Kältemittel verloren, welches sich gasförmig in dem besagten kurzen Teilabschnitt befindet. (Siehe 3.3)

3.1.8 Service Gerät für Autoklimaanlagen

Beim Secu Smart von der Fa. Behr und Hell, handelt es sich um ein Gerät für Wartung von Autoklimaanlagen. Mit dem Secu Smart kann R134a abgesaugt, befüllt, der Kreislauf gespült und evakuiert werden. Beim Absaugen wird das Kältemittel bis auf den Umgebungsdruck wieder zurückgewonnen. Sollte sich dabei Öl im abgepumpten Kältemittel befinden, wird das Öl vor dem Rückfüllen in die sich im Secu Smart befindende Kältemittelflasche abgeschieden. Das Gerät zeigt dabei jeweils die Menge des abgesaugten bzw. befüllten Kältemittels an, sowie die Menge des abgesaugten Öles.

3.1.9 T-Stückeinlage

Um mögliche Strömungstodgebiete und dadurch Ölsammlungen zu vermeiden, wurde in den T-Stücken Stegumlenkungen eingebaut. Diese zwingen die Strömung bis zum Ende des Leitungsstutzens zu fließen. Dadurch sollen Todgebiete verhindert werden. Eine schematische Darstellung befindet sich in Abbildung 3-6.

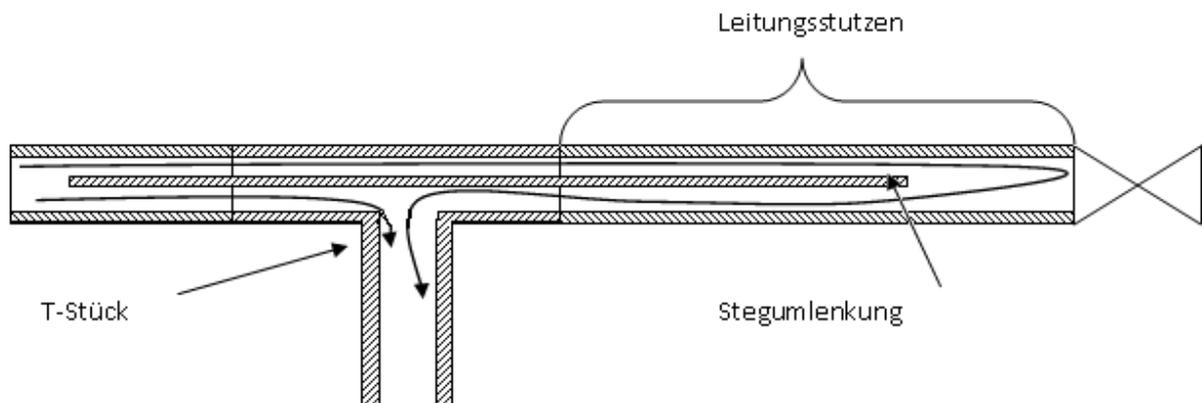


Abbildung 3-6 T-Stückeinlage

3.2 Messtechnik

Für die Erfassung der zu messenden Größen von Druck, Temperatur und Schallgeschwindigkeit wurden folgende Messgeräte verwendet:

3.2.1 Messauswerteeinheit

Dabei handelt es sich um ein Field Point FP-1000 der Fa. National Instruments. Über dieses Gerät werden Druck und Temperatur des PT100 erfasst. Außerdem erfolgt damit auch die Ansteuerung der Magnetventile für die Druckregulierung.

3.2.2 Druckmessung

Dabei handelt es sich um das Messgerät „Cerabar M- PMC51“ der Fa. Endress + Hauser. Der Drucksensor hat einen 4 - 20 mA Analog-Ausgang. Der Druck wird absolut gemessen. Der kalibrierte Bereich liegt von 0 bis 30 bar absolut. Die Messgenauigkeit liegt bei 0,44% vom Messwert.

3.2.3 Schallmessgerät

Hierbei handelt es sich um das Messgerät SPRn 4214 (LS) der Fa. Anton Paar. Dieses Messgerät hat im Inneren einen Sender und einen Empfänger eingebaut. Damit wird die Laufzeit von einem akustischem Signal ermittelt, welches ein Maß für die Schallgeschwindigkeit ist. In Abbildung 3-7 ist der Schallsensor dargestellt. Die Abmessungen sind dabei in mm.

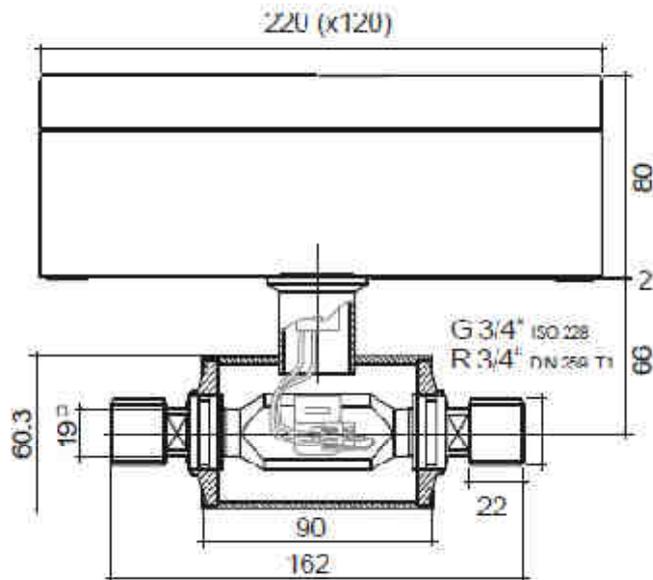


Abbildung 3-7 Skizze Schallsensor Anton Paar

Zusätzlich befinden sich an diesem Gerät eine Temperaturmessung. Es handelt sich dabei um ein PT1000.

Das Gerät wurde von der Fa. „Anton Paar“ im Temperaturbereich von 0 bis 70 °C kalibriert und die Schallgeschwindigkeit im Bereich 250 bis 750 m/s.

- Genauigkeit der Temperaturmessung: $\pm 0,01$ K
- Genauigkeit der Schallgeschwindigkeit: $\pm 0,1$ m/s

Die Messgenauigkeiten gelten lediglich für den kalibrierten Messbereich.

Die Daten des Schallsensors werden über eine serielle Schnittstelle direkt in den Computer eingelesen.

3.2.4 Temperaturmessung

Wegen dem erheblichen Einfluss der Temperatur auf die Schallgeschwindigkeit wurde eine zweite Temperaturmessung vorgenommen. Dies erfolgte mit einem PT100, der axial zur Strömungsrichtung eingebaut wurde (vgl. Abbildung 3-1) . Da es allerdings stets zu unterschiedlichen Temperaturen zwischen dem Schallsensor und dem PT100 kam, wurde eine weitere Anordnung aufgebaut, in der eine gleichzeitige Kalibrierung beider Messgeräte durchgeführt werden konnte.

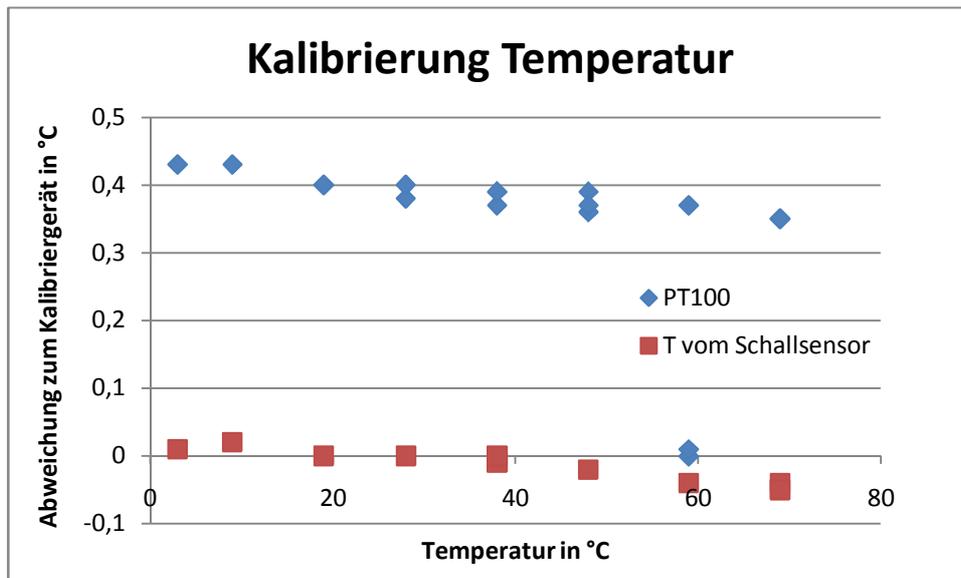


Abbildung 3-8 gleichzeitige Kalibrierung der Temperturmessgeräte

In Abbildung 3-8 zeigte sich, dass der PT100, welcher zuvor schon kalibriert wurde, erneut eine Abweichung von rund 0,4 K hatte. Die Temperaturmessung durch das Messgerät von Anton Paar zeigte allerdings den Wert des Kalibriegeräts an. Somit wurde auf die zweite Temperaturmessung verzichtet und nur die Temperatur des Schallsensors verwendet. Die Ursache des falschen Wertes konnte bis dato nicht festgestellt werden.

3.3 Befüllungsvorgang:

Für den Messstand ist es notwendig zu wissen, welche Menge an Kältemittel sich darin befindet. Durch das kleine Systemvolumen von ca. 260 ml soll das Kältemittel auf der Waage mit einem maximalen Gewicht von 6 kg vermessen werden. Dadurch kann die Füllmenge auf 0,1g bestimmt werden. Der angelieferte Behälter für das Kältemittel wiegt rund 10 kg. Deswegen wird der Messstand vom Befüllungsbehälter gefüllt, der vorher von der Kältemittelflasche befüllt wurde.

Auch das eingebaute Rückschlagventil an der Kältemittelflasche war ein Kriterium, dass der Messstand von einem Befüllungsbehälter befüllt wird.

Befüllungsbehälter evakuieren und an die Kältemittelflasche anschließen:

Siehe Abbildung 3-9

Ventil 1 offen (Ventil zum Seco Smart)

Ventil 2 geschlossen (Ventil auf der Kältemittelflasche)

Ventil 3 offen (Eingangsventil beim Befüllungsbehälter)

Ventil 4 geschlossen (Ausgangsventil beim Befüllungsbehälter)

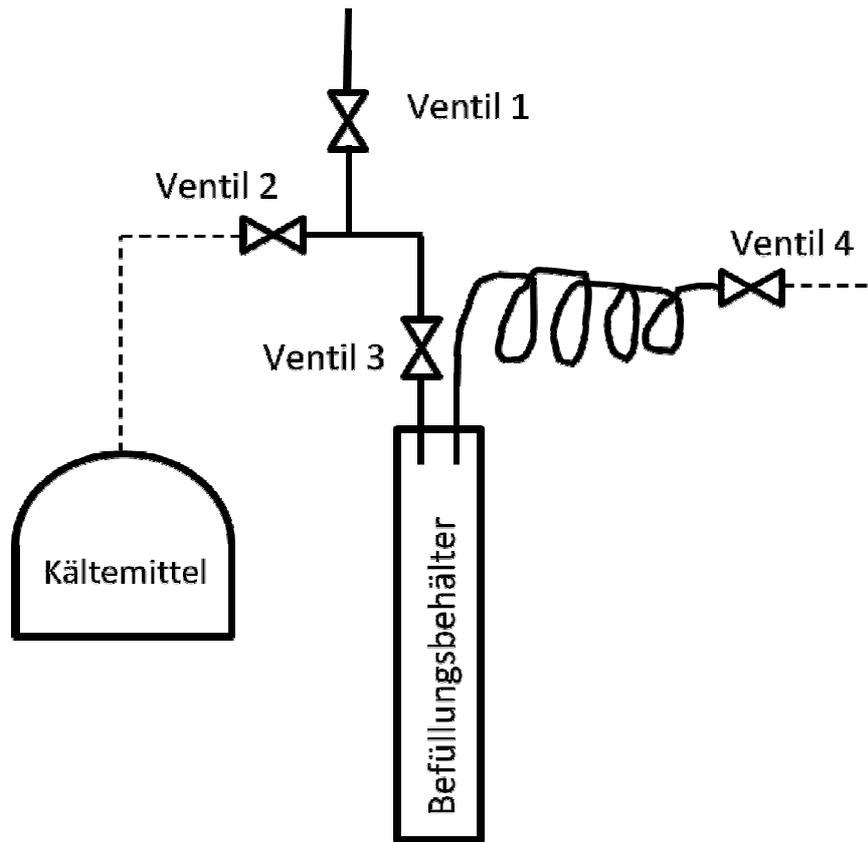


Abbildung 3-9 Evakuieren des Befüllungsbehälters

Befüllung des Befüllungsbehälters:

Siehe Abbildung 3-10

Ventil 1 geschlossen (Ventil zum Seco Smart)

Ventil 2 offen (Ventil auf der Kältemittelflasche)

Ventil 3 offen (Eingangsventil beim Befüllungsbehälter)

Ventil 4 geschlossen (Ausgangsventil beim Befüllungsbehälter)

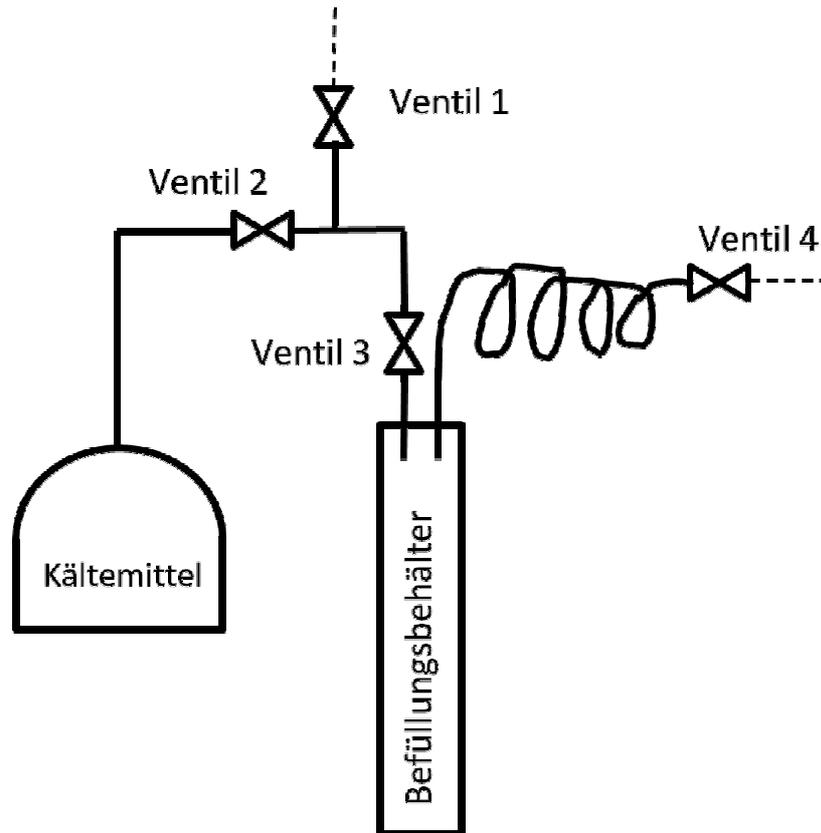


Abbildung 3-10 Befüllung des Befüllungsbehälters

Dabei ist notwendig die Kältemittelflasche zu erwärmen (z.B. durch einen warmen Wassereimer) und den Befüllungsbehälter mit kaltem Wasser zu kühlen. Dadurch verdampft Kältemittel in der Kältemittelflasche, strömt in den Befüllungsbehälter und kondensiert.

Erhitzen des Zwischenstücks zwischen Ventil 1 -3:

Siehe Abbildung 3-11

Ventil 1 geschlossen (Ventil zum Seco Smart)

Ventil 2 geschlossen (Ventil auf der Kältemittelflasche)

Ventil 3 offen (Eingangsventil beim Befüllungsbehälter)

Ventil 4 geschlossen (Ausgangsventil beim Befüllungsbehälter)

Mit einem Heißluftfön wird die Leitung zwischen den Ventilen 1-3 erwärmt. Dadurch wird das evtl. flüssig vorliegende Kältemittel gasförmig. Im Befüllungsbehälter ist das Kältemittel allerdings flüssig und gasförmig.

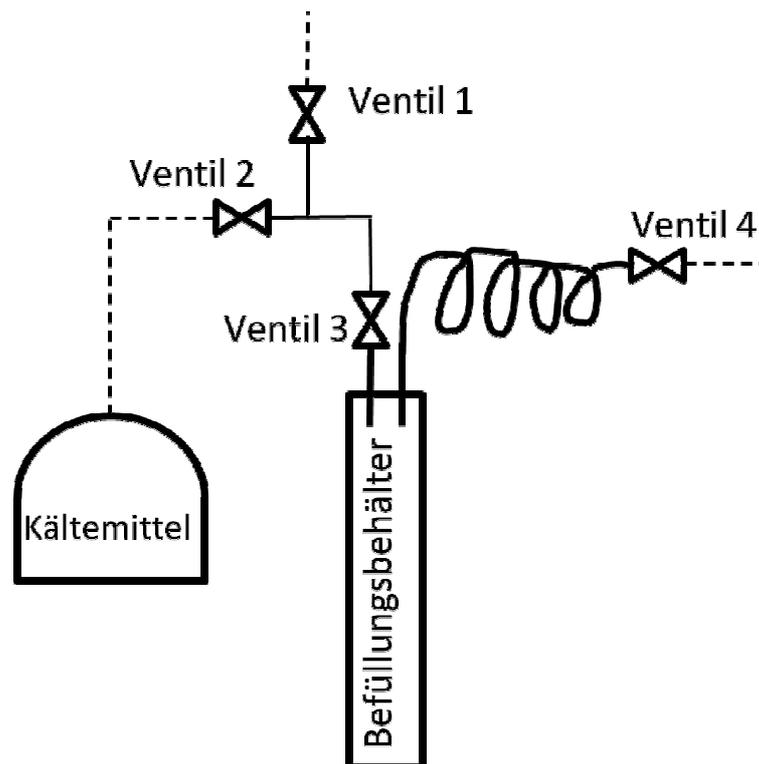


Abbildung 3-11 Erhitzen des Zwischenstückes Ventil 1-3

Ende des Füllvorganges des Befüllungsbehälters:

Siehe Abbildung 3-12

Ventil 1 geschlossen (Ventil zum Seco Smart)

Ventil 2 geschlossen (Ventil auf der Kältemittelflasche)

Ventil 3 geschlossen (Eingangsventil beim Befüllungsbehälter)

Ventil 4 geschlossen (Ausgangsventil beim Befüllungsbehälter)

Wurde das Zwischenstück zwischen den Ventilen 1-3 erwärmt, wird der Fön ausgeschaltet und Ventil 3 geschlossen. Beim Abmontieren der Kältemittelflasche und dem Zwischenstück entweicht das darin befindliche restliche Kältemittel, das gasförmig vorliegt, in die Umgebung.

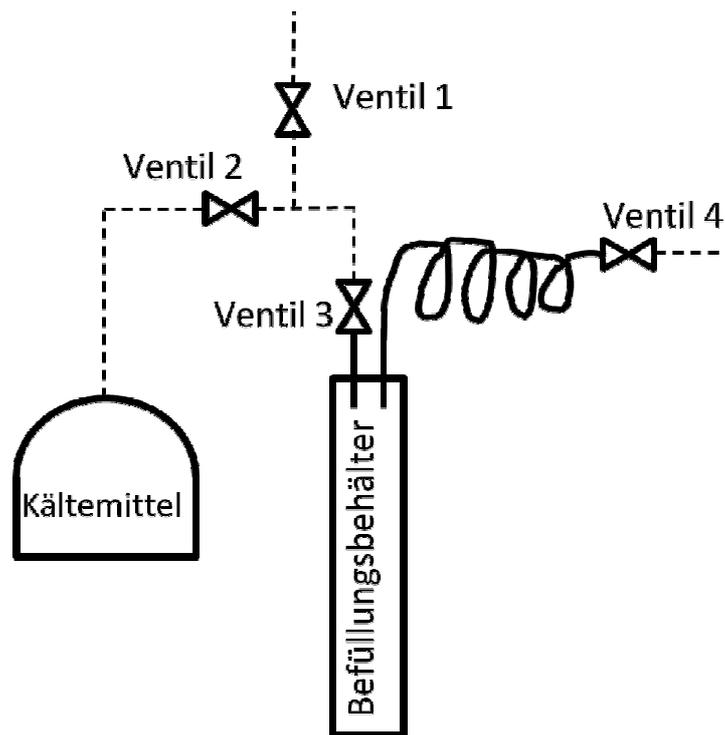


Abbildung 3-12 Ende des Füllvorganges des Befüllungsbehälters

Anschluss des Befüllungsbehälters an den Messstand:

Siehe Abbildung 3-13

Ventil 4 geschlossen (Ausgangsventil beim Befüllungsbehälter)

Ventil 5 offen (Eingangsventil zum Messstand)

Ventil 6 offen (Ausgangsventil vom Messstand)

Der Befüllungsbehälter wird abgewogen um das Gewicht des gesamten Behälters ermitteln zu können. Im Anschluss wird der Befüllungsbehälter an den Messstand angeschlossen und das Volumen des Messstandes inkl. dem Zwischenstück von Ventil 4 und 5 zu evakuieren.

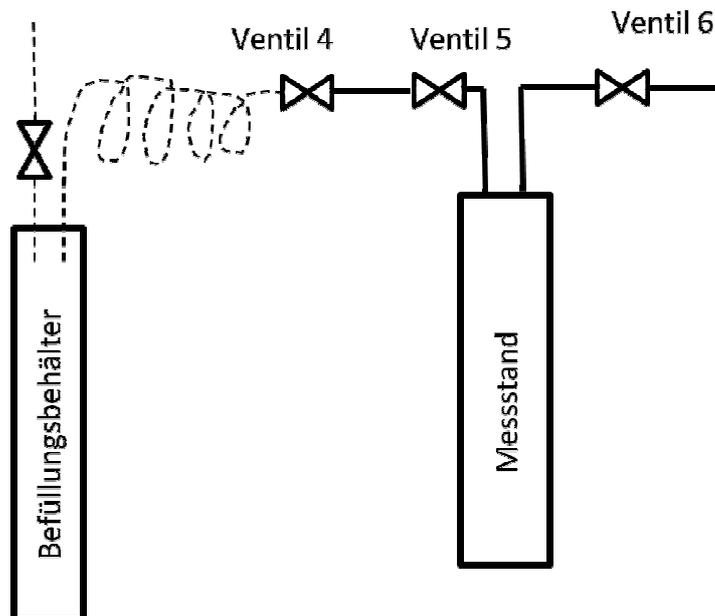


Abbildung 3-13 Anschluss an Messstand

Füllvorgang des Messstandes:

Siehe Abbildung 3-14

Ventil 4 offen (Ausgangsventil beim Befüllungsbehälter)

Ventil 5 offen (Eingangsventil zum Messstand)

Ventil 6 geschlossen (Ausgangsventil vom Messstand)

Die Befüllung erfolgt ausschließlich im dampfförmigen Zustand. Dies soll verhindern, dass Öl, welches sich ggf. im Befüllungsbehälter befindet, so gut wie möglich zurückgehalten wird. Das Öl kann unter Umständen durch Reste in den Verbindungsleitungen in den Befüllungsbehälter gelangen.

Die Pumpe wird eingeschaltet. Mit Hilfe des Wärmetauschers wird das Kältemittel unter die niedrigste Temperatur des kältesten Messpunkt abgekühlt (-5 °C) (vgl. Kapitel 3.4). Nun wird der Druck auf der Stickstoffseite im Ausdehnungsgefäß aufgebracht, damit die Membran auf der Seite des Kältemittels anliegt. Dadurch strömt das überschüssige Kältemittel wieder zurück in den Befüllungsbehälter. Dies ist notwendig, damit mit fallender Dichte des Kältemittels bei steigender Temperatur die Volumenausdehnung sichergestellt wird.

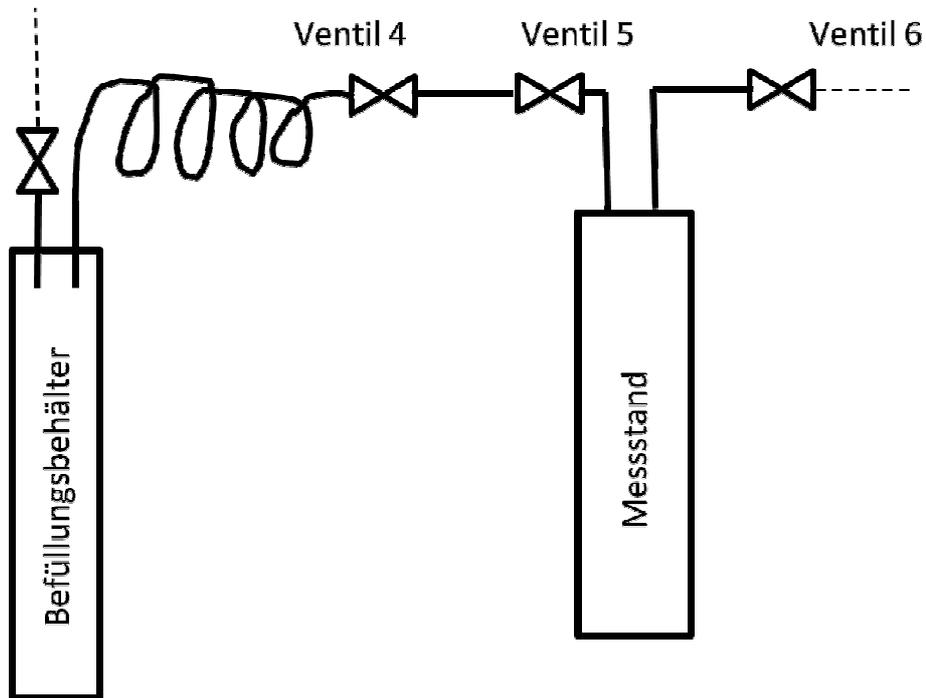


Abbildung 3-14 Füllvorgang des Messstandes

Abschließen des Befüllungsbehälters:

Siehe Abbildung 3-15

Ventil 4 geschlossen (Ausgangsventil beim Befüllungsbehälter)

Ventil 5 geschlossen (Eingangsventil zum Messstand)

Ventil 6 geschlossen (Ausgangsventil vom Messstand)

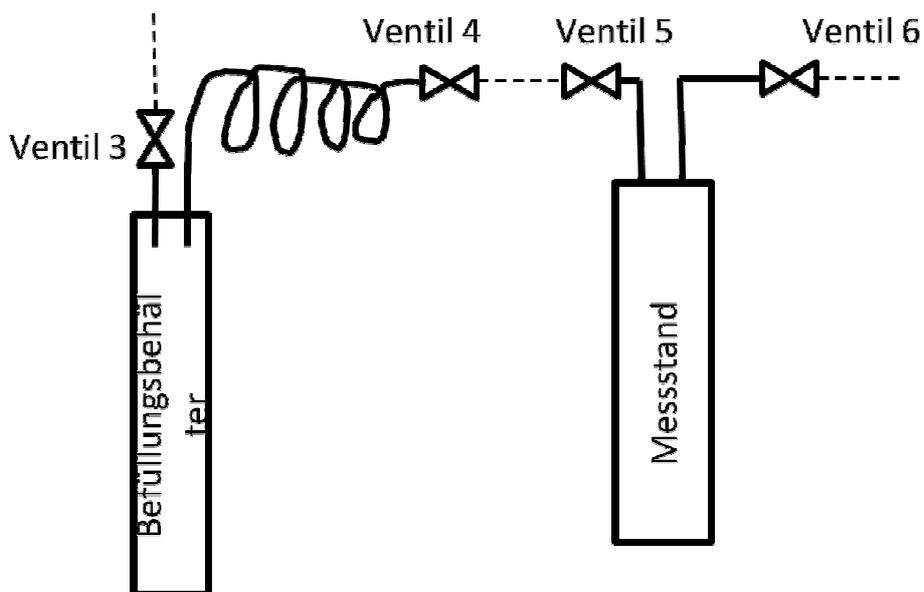


Abbildung 3-15 Abschließen des Befüllungsbehälters

Im Anschluss wird das Ventil 5 geschlossen. Nun wird mittels eines Föns oder eines ähnlichen Heizgerätes die Verbindungsleitung zwischen Ventil 4 und 5 erwärmt, um eine flüssige Phase in dem Verbindungsstück zu verhindern.

Im Anschluss wird das Ventil 4 geschlossen und der Befüllungsbehälter vom Messstand abmontiert. Bei diesem Schritt wird Kältemittel, das sich in der Verbindungsleitung zwischen Ventil 4 und 5 befindet, entweichen. Nach erneutem Abwiegen des Befüllungsbehälters ist nun bekannt, welche Menge an Kältemittel sich im Messstand befindet.

Die Vorbereitungen für die Messung sind nun abgeschlossen.

3.4 Ablauf der Messung

Für den Start der automatisierten Messung muss die Temperatur bereits jenen Wert erreicht haben, welcher bei dem ersten Temperaturniveau gefordert wird. Im Anschluss erfolgt der Programmstart am Computer und am Lauda Becken. Das Lauda Becken hält für eine gewisse Zeit die Temperatur konstant, bevor die nächste Temperatur angefahren wird. In dieser Zeit werden unterschiedliche Drücke über die Magnetventile automatisch eingestellt. Sind alle eingestellten Messpunkte bei dieser Temperatur vermessen, erfolgt eine Wartezeit. Diese Zeit ist notwendig, um sich nach Abschluss der Messung, das Wasser des Lauda Beckens zum nächsten Temperaturniveau aufheizen kann. Außerdem muss die Temperatur des Kältemittels auch auf das nächst höhere Temperaturniveau gebracht werden und wieder einen stationären Zustand annehmen. Abbildung 3-16 zeigt den Ablauf der automatischen Messung an. Bei einem Temperaturniveau werden die Drücke vom höchsten zum niedrigsten Druck vermessen.

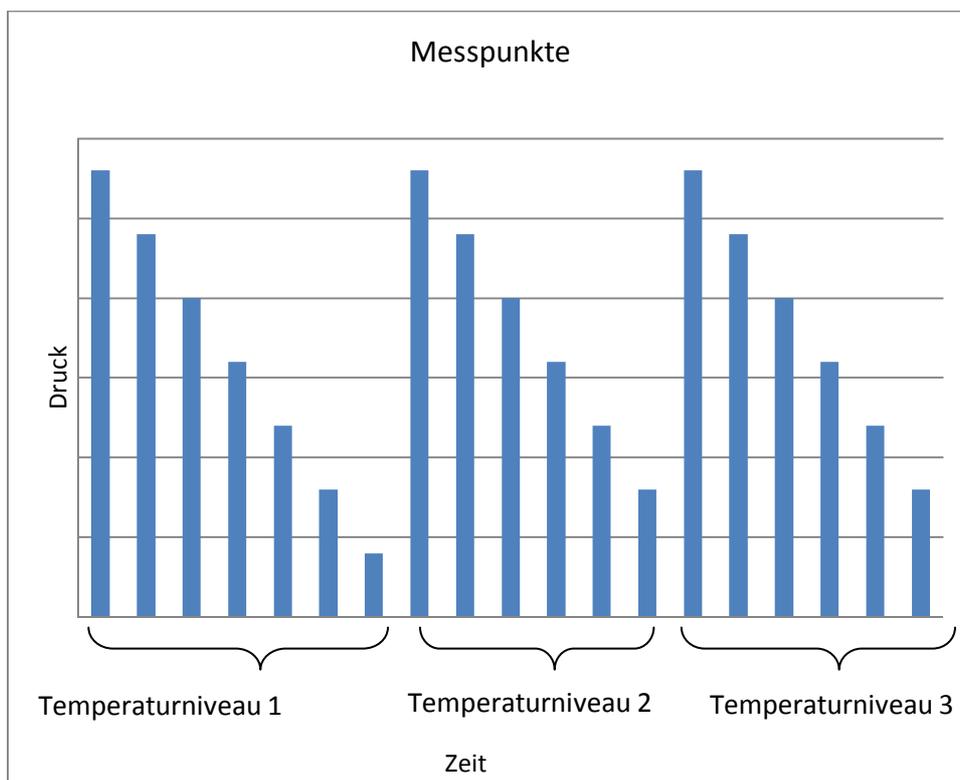


Abbildung 3-16 Systematischer Verlauf der Messpunkte

Ist die höchste Temperatur vermessen, ist ein Eingreifen des Benutzers notwendig. Das Kältemittel muss wieder abgekühlt werden und die nächste Ölkonzentration (siehe 3.1.6) wird eingestellt. Hat das Kältemittel wieder die Temperatur des ersten Messpunktes erreicht, kann der nächste Vermessungsdurchgang mit der nächsten Konzentration gestartet werden.

In Tabelle 3-1 sind die Messpunkte mit deren Druck und Temperaturniveau aufgelistet. Die Messung eines Punktes dauert zwei Minuten, wobei jede Sekunde ein Druck- Temperatur- und Schallgeschwindigkeits-Messwert aufgenommen wird. Mit diesen Messwerten wird ein zeitlicher Mittelwert ermittelt und die Standardabweichung errechnet. Die Standardabweichung ist zugleich ein Anzeichen, wie stationär die Messung war.

$$a_{\text{Mittelwert}} = \frac{\sum_{i=1}^N a_i}{N} \quad (\text{GL. 3-1})$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a}_{\text{Mittelwert}})^2}{N - 1}} \quad (\text{GL. 3-2})$$

- a_i gemessene Schallgeschwindigkeit eines Messpunktes
 N Anzahl der Messpunkte zu einem eingestellten Druck und Temperatur
 s geschätzte Standardabweichung
Analog dazu gilt der gleiche Rechenvorgang für Druck und Temperatur.

Die geschätzte Standardabweichung gibt die Streuung der Messwerte um den geschätzten Mittelwert an. Dabei gibt diese die Schranke nach oben und nach unten an, zwischen denen sich 68 % der Messwerte befinden. Eine geringe Standardabweichung bedeutet, dass die Zustände der einzelnen Punkte während der Messung sich kaum verändert haben.

Tritt allerdings eine Entmischung auf, nimmt die geschätzte Standardabweichung von der Geschwindigkeit zu. Die geschätzten Standardabweichung von Temperatur und Druck sind dabei nicht höher als bei anderen Messpunkten.

3.5 Datenloggerprogramm

Für die Messdatenerfassung wurde das Programm LabView 7.1 verwendet. In Abbildung 3-17 ist die Oberfläche des verwendeten Programms dargestellt. Es werden vier Graphen dargestellt. Auf jedem dieser Graphen ist der zeitliche Verlauf der vier erfassten Messgrößen (Temperatur des PT100, Temperatur des Schallsensors, Druck, Schallgeschwindigkeit) dargestellt. Dies ermöglicht eine rasche Feststellung ob die Messung bei einem stationären Zustand erfolgt.

3. Messstand

Unterhalb befinden sich die Anhaltspunkte für die Standardabweichungen der einzelnen Messgrößen in welcher Größenordnung sich die Standardabweichungen maximal bewegen.

$$\Delta T = \pm 0,03 \text{ K}$$

$$\Delta p = \pm 0,01 \text{ bar}$$

$$\Delta a = \pm 0,2 \text{ m/s}$$

Eine genauere Auskunft über den stationären Zustand der Messung, wird bei der Datenauswertung mit Hilfe der Standardabweichung (siehe Kapitel 3.4) gegeben.

Es gibt unter anderem noch zusätzlich zwei Bedienelemente für die Steuerung der Magnetventile. Ventil 0 ist für die Erhöhung des Druckes zuständig, Ventil 1 für die Verringerung des Druckes.

Im Normalfall übernimmt das Programm die Steuerung für den Druck über die Magnetventile. Ist ein externes Eingreifen für das Druckniveau im Messstand erforderlich, ist dafür eine Möglichkeit in der Programoberfläche gegeben.

In Abbildung 3-18 ist ein Ausschnitt für Eingabebedingungen mit dem Namen „measurecontrol.vi“ dargestellt. Dabei handelt es sich auch um die Messmatrix, die unter 3.6 behandelt wird. Ein Stromfluss von 0,004 A bedeutet ein geschlossenes Ventil, bei einem Strom von 0,02A wird das Ventil geöffnet. Auf diese Tabelle wird vom „mainprogram“ zugegriffen, um festzustellen, welcher Druck eingestellt werden soll. Die erste Spalte gibt an, welcher Druck im Messsystem gefordert wird.

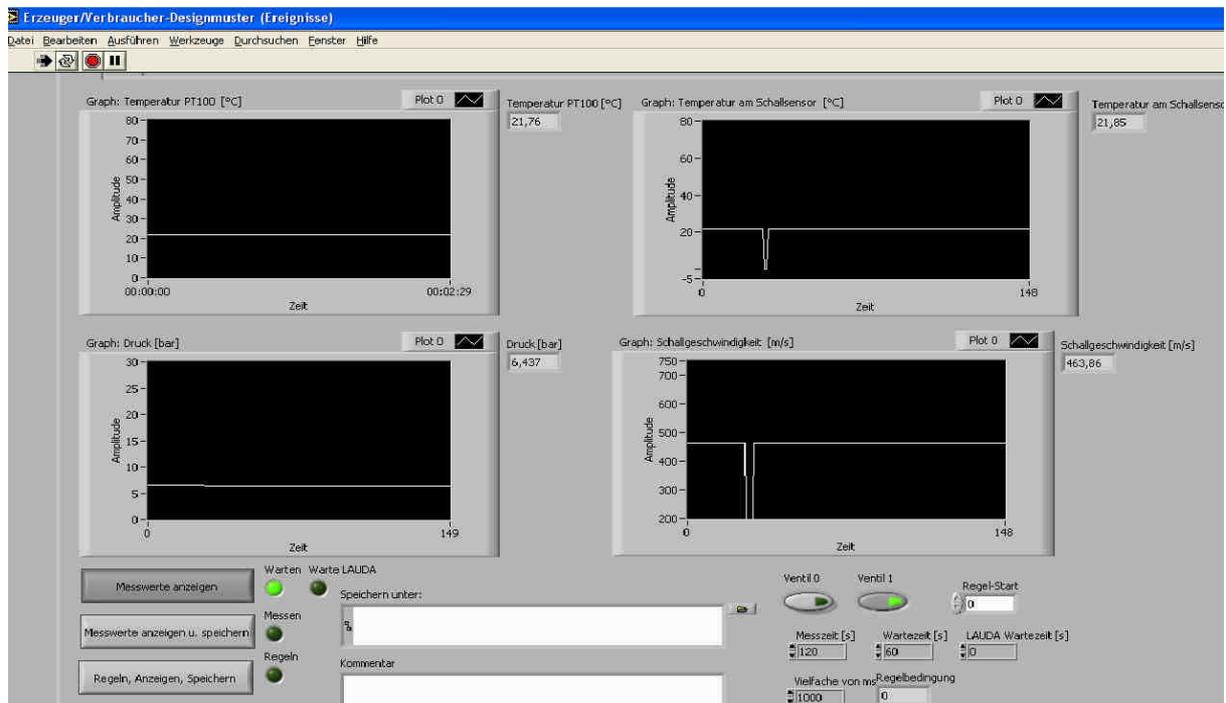
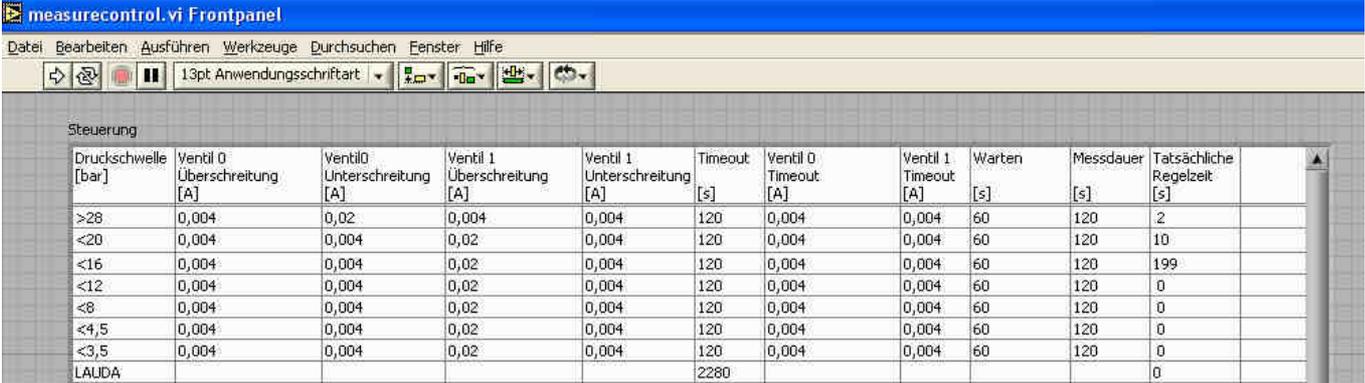


Abbildung 3-17 Oberfläche des verwendeten Datenlogprogramm

Zum Beispiel gibt die erste Zeile an, dass der Druck im System mehr als 28 bar betragen muss, um Ventil 0 zu schließen. Bei dieser Bedingung bleibt Ventil 1

3. Messstand

(siehe Abbildung 3-2) stets geschlossen (ist für die Druckreduzierung verantwortlich). Sollte aus irgendeinem Grund der Druck nicht nach der Timeout Zeit erreicht worden sein (Druck von der Stickstoffflasche ist zu gering, etc...), schließt das Ventil selbstständig und führt den nächsten Schritt im Programm aus. Da sich die Temperatur nach dem Schließen des Ventils meist noch etwas einpendelt, folgt nach dem Schließen des Ventils die Wartezeit (60 s). Ist die Wartezeit verstrichen, beginnt die 120 s lange Messung.



The screenshot shows the 'measurecontrol.vi Frontpanel' with a menu bar (Datei, Bearbeiten, Ausführen, Werkzeuge, Durchsuchen, Fenster, Hilfe) and a toolbar. Below is a table titled 'Steuerung' with the following data:

Druckschwelle [bar]	Ventil 0 Überschreitung [A]	Ventil 0 Unterschreitung [A]	Ventil 1 Überschreitung [A]	Ventil 1 Unterschreitung [A]	Timeout [s]	Ventil 0 Timeout [A]	Ventil 1 Timeout [A]	Warten [s]	Messdauer [s]	Tatsächliche Regelzeit [s]
>28	0,004	0,02	0,004	0,004	120	0,004	0,004	60	120	2
<20	0,004	0,004	0,02	0,004	120	0,004	0,004	60	120	10
<16	0,004	0,004	0,02	0,004	120	0,004	0,004	60	120	199
<12	0,004	0,004	0,02	0,004	120	0,004	0,004	60	120	0
<8	0,004	0,004	0,02	0,004	120	0,004	0,004	60	120	0
<4,5	0,004	0,004	0,02	0,004	120	0,004	0,004	60	120	0
<3,5	0,004	0,004	0,02	0,004	120	0,004	0,004	60	120	0
LAUDA					2280					0

Abbildung 3-18 MeasureControl.vi

Im Anschluss wird Ventil 1 geöffnet und bleibt dies, bis der Druck im Messstand unter den eingetragenen Druck fällt (siehe Abbildung 3-18). Bei der ersten Öffnung von Ventil 1 bedeutet dies, dass der Druck im Messstand auf unter 20 bar sinken muss (zweite Zeile in Abbildung 3-18), damit sich das Ventil 1 wieder schließt. Auch hier ist eine Timeout Zeit vorgesehen, die bei Nichtunterschreiten des geforderten Druckes das Ventil schließt. Danach erfolgen wieder die Wartezeit und die Messung. Nach Abarbeiten der unterschiedlichen Druckstufen erfolgt die Wartezeit für das Lauda Becken (vergleiche Kapitel 3.4).

Da zum Erreichen des geforderten Druckes nicht immer die gleiche Zeit benötigt wird, wird die tatsächlich benötigte Zeit für das Regeln, Warten und Messen addiert. Diese Zeitdauer wird in die letzte Spalte in Abbildung 3-18 vom Programm selbstständig eingetragen. Dadurch ergibt sich nach der Vermessung des kleinsten Druckes die gesamte Zeit für diese Messreihe.

Bis die nächste Messreihe bei einer neuen Temperatur vermessen werden kann, muss eine neue Temperatur im Lauda Becken bereits erreicht sein. Dies benötigt mit dem verwendeten Becken in etwa 6 min für ein ΔT von 10 K.

Somit ergibt sich je nach Anzahl der vermessenen Druckniveaus eine unterschiedliche Verweilzeit des Lauda Beckens bei einer Temperatur.

Das Wissen über die tatsächlich benötigte Regelzeit des Druckes ist aus folgendem Grund erforderlich:

Im Lauda Becken ist ein Programm hinterlegt, welches bestimmt, wie lange auf eine bestimmte Temperatur geregelt werden soll. Nach Ablauf dieser Zeit wird je

nach Programm am Lauda Becken für eine vorgegebene Zeit auf eine neue Temperatur hin geregelt. Ist das Programm früher fertig, muss dennoch gewartet werden, bis das Lauda Becken auf die neue Temperatur hin regelt, bzw. diese auch erreicht hat.

3.6 Messmatrix

Aus Tabelle 2-1 bis Tabelle 2-6 zeigt sich, dass bei einer fix vorgegebenen Anzahl von Messpunkten der Messbereich am besten abgedeckt wird, wenn 5 mal mehr Temperaturmesspunkte als Druckmesspunkte vermessen werden. D.h. würde in einem Abstand von 1 K gemessen, könnte der nächste vermessene Druck um 5 bar verändert sein, um das Messband gleichmäßig abzudecken.

Diese Überlegung kommt von der Tatsache, dass es eine ca. fünf Mal größere Schalländerung aufgrund von 1 K als durch 1 bar gibt.

Da sich die Schallgeschwindigkeit linear zur Druckänderung verhält, jedoch mit der zweiten Potenz zur Temperatur (Ahnenfeld et al. 1996), ist es in der Hinsicht besser, mehr Punkte an unterschiedlichen Temperaturen zu messen.

Da Messpunkte mit unterschiedlichen Drücken relativ rasch vermessen werden können, wurde es nicht eingehalten, dass fünf Mal mehr Temperaturen als Druckpunkte vermessen worden sind.

Prinzipiell sei gesagt, dass mit mehr Messpunkten die zufälligen Messfehler besser ausgeglichen werden können. Durch die automatisierte Vermessung einer Konzentration wurden mehr Messpunkte als für die spätere Erstellung der Ausgleichskurve notwendig sind vermessen.

Tabelle 3-1 zeigt eine Übersicht der Messpunkte die für eine Ölkonzentration angefahren werden. Es handelt sich dabei um 45 Messpunkte pro Konzentration. Die Trägheit des Druckmessgeräts, aber auch die zu geringe Elastizität der Membran hat dazu geführt, dass der geringste Druck nicht immer korrekt eingestellt wurde. Dadurch konnten nicht alle Messergebnisse für die Auswertung verwendet werden. Ob ein Messpunkt verwendet werden konnte, zeigt sich unter anderem stets bei der Kontrolle der Standardabweichung.

Tabelle 3-1 Messmatrix einer Konzentration für R1234yf

Messmatrix	Temperatur in °C							
Druck in bar	0	10	20	30	40	50	60	70
28	x	x	x	x	x	x	x	x
24		x	x	x		x	x	x
22								x
20,9								x
20	x	x	x	x	x	x		
19							x	
17,5							x	
16	x	x	x		x			
15,5						x		
14				x		x		
12,5					x			
12	x		x					
10,9					x			
9,5				x				
8,3				x				
8	x	x						
7,5			x					
6,3			x					
5,9		x						
4,8		x						
4,5	x							
3,5	x							

Mit dem geringsten eingestellten Druck bei einer eingestellten Temperatur wurde versucht, möglichst nahe an der Sättigungstemperatur zu messen. Tabelle 3-2 gibt die angestrebten Unterkühlungen für R1234yf an. Darin ist ersichtlich, dass meist eine Unterkühlung von $\Delta T = 3 \text{ K}$ angestrebt wurde.

Die geringste Unterkühlung wurde mit dem kleinsten eingestellten Druck bei jedem Temperaturniveau errechnet. Dabei wurde der Sättigungsdruck des geplanten Temperaturniveaus errechnet und dieser von der Verdampfungstemperatur des geringsten angestrebten Druck subtrahiert.

Bei den ersten Messungen hat sich gezeigt, dass nicht näher an den Sättigungsdruck angesteuert werden konnte als in Tabelle 3-2 dargestellt. Grund dafür war die etwas zeitversetzte Ausgabe des Drucksensorsignals. Das führte dazu, dass der Druck sich noch eine Zeit lang veränderte, obwohl die Magnetventile bereits geschlossen waren. Durch die Erfahrung der ersten Messungen wurden die geringsten angestrebten Drücke bei den einzelnen Temperaturniveaus gewählt

Eine solche Matrix wurde für R134a noch nicht erstellt, da die automatische Vermessung erst bei der Vermessung von R1234yf fertiggestellt wurde.

Tabelle 3-2 angestrebte Unterkühlung von R1234yf

Temperatur in °C	Unterkühlung in ΔK
0	3,1
10	3,0
20	2,2
30	2,1
40	2,7
50	3,1
60	2,9
70	1,0

3.7 Entleerungsvorgang

Ist ein Öl/Kältemittel-Gemisch bis zur höchsten gewünschten Konzentration vermessen, wird das Ventil zwischen dem Messstand und Entleerungsbehälter geöffnet. Der Entleerungsbehälter und dessen Verbindungsleitungen sind vorher zu evakuieren. Dadurch fällt der Druck im gesamten System ab. Durch Abkühlen des Entleerungsbehälters wird der Systemdruck noch weiter reduziert, da die Temperatur im Entleerungsbehälter durch den Dampfdruck den Systemdruck vorgibt. Die Leitungen im Messstand füllen sich mit Dampf und die flüssige Phase befindet sich im Entleerungsbehälter.

Ist der gewünschte Druck im System erreicht (z.B. 3,7 bar bei 5 °C), werden die Ventile zum Messstand geschlossen. Je mehr der Entleerungsbehälter gekühlt wird, desto mehr kann vom Kältemittel rückgewonnen werden.

Tabelle 3-3 gibt an, welche Restmenge im Messstand mit einem Volumen von 260 ml bei R1234yf verbleibt.

T gibt dabei an, auf welche Temperatur der Entleerungsbehälter gekühlt wird und welcher Druck sich durch den Dampfdruck dieser Temperatur einstellt.

Die Dichte ergibt sich durch die Zustände vom Dampfdruck und der Temperatur im Messstand. Diese Temperatur wurde dabei als Umgebungstemperatur (20 °C angenommen).

Da damit das Kältemittel im Messstand gasförmig vorliegt, ergibt sich mit dem Systemvolumen jene Menge, die zurückbleibt und an die Umgebung abgegeben werden muss.

Tabelle 3-3 Restmenge im Messstand bei Entleerung

T in °C	p _s in bar	Dichte kg/m ³	Restmenge in g
10	4,4	23,0	6,0
5	3,7	19,2	5,0
0	3,2	16,0	4,2
-5	2,7	13,3	3,5

3.8 Recycling des Kältemittels

Nach der Entleerung des Messstandes kann der Befüllungsbehälter an den Entleerungsbehälter angeschlossen werden und die dampfförmige Phase wird in den Befüllungsbehälter befördert. Da lediglich die dampfförmige Phase langsam abgezogen wird, bleibt das Öl, welches sich zuvor im Messstand befand, im Entleerungsbehälter zurück.

Durch das geringe Systemvolumen, wurde allerdings das „recycelte“ Kältemittel in einen externen Behälter gefüllt und nicht zurück in den Befüllungsbehälter, um die Unsicherheit für weitere Messungen durch evtl. nicht 100 % Öl freies recyceltes Kältemittel aus dem Entleerungsbehälter zu vermeiden.

4 Messauswertung

Relativ gesehen verursacht das Öl eine sehr geringe Veränderung der Schallgeschwindigkeit. In der Größenordnung von etwa +5 m/s pro 1 % OCR sind dies bei 0 °C eine Schallgeschwindigkeitsänderung um etwa 0,8 %.

Im Weiteren werden zwei hypothetische Annahmen getroffen, mit denen die geringe Schallgeschwindigkeitserhöhung von Öl verdeutlicht werden soll.

- Es liegt bereits eine Ausgleichskurve vor, die 100 % richtig ist
- Zwei der drei Messgrößen können exakt ohne Messunsicherheit gemessen werden

Mit diesen zwei Annahmen müsste die dritte Messgröße wie in Tabelle 4-1 und Tabelle 4-2 dargestellt, auf jenen Wert genau gemessen werden, um den OCR auf 0,1 % - Punkte genau vermessen zu können.

Tabelle 4-1 maximale zulässige Messfehler um $\Delta\text{OCR} = 0,1 \%$ - Punkte für R1234yf bei 5 bar/5 °C

$\Delta a =$	0,50 m/s
$\Delta T =$	0,12 K
$\Delta p =$	0,56 bar

Tabelle 4-2 maximale zulässige Messfehler um $\Delta\text{OCR} = 0,1 \%$ - Punkte für R1234yf bei 25 bar/70 °C

$\Delta a =$	0,50 m/s
$\Delta T =$	0,09 K
$\Delta p =$	0,16 bar

Bemerkung: Wie stark sich Druck, Temperatur und Schallgeschwindigkeit unter Berücksichtigung der Ausgleichsfunktion auf den berechneten OCR Gehalt auswirken, wird im Kapitel 4.7 behandelt. Um den Einfluss abschätzen zu können, muss zunächst der Zusammenhang mit Hilfe einer Ausgleichsfunktion gefunden werden.

4.1 Diskussion der Vermessung von reinem R134a

Das reine Kältemittel R134a wurde vermessen und die Messergebnisse sind in Abbildung 4-2 dargestellt. Durch die Reduzierung des Druckniveaus bei einer fix eingestellten Lauda Becken Temperatur änderte sich die Temperatur des Kältemittels zwischen den einzeln vermessenen Druckpunkten. Die Veränderung der Temperatur im Kältemittel über dem Druck ist in Abbildung 4-1 für R134a dargestellt, bei einer fix eingestellten Lauda Temperatur von -1,6 °C. Es zeigt wie die Temperatur beim größten Druck von ca. 28 bar und einer Temperatur von 0,18 °C auf ca. 0,03 °C beim kleinsten dargestellten Druck sich verringert. Diese Temperatur der einzelnen Messpunkte repräsentieren trotz der Veränderung der Temperatur das Temperaturniveau von 0 °C. Es sei erwähnt, dass sich die Temperatur während des Messens nicht veränderte, sondern lediglich beim Einstellen des Druckes.

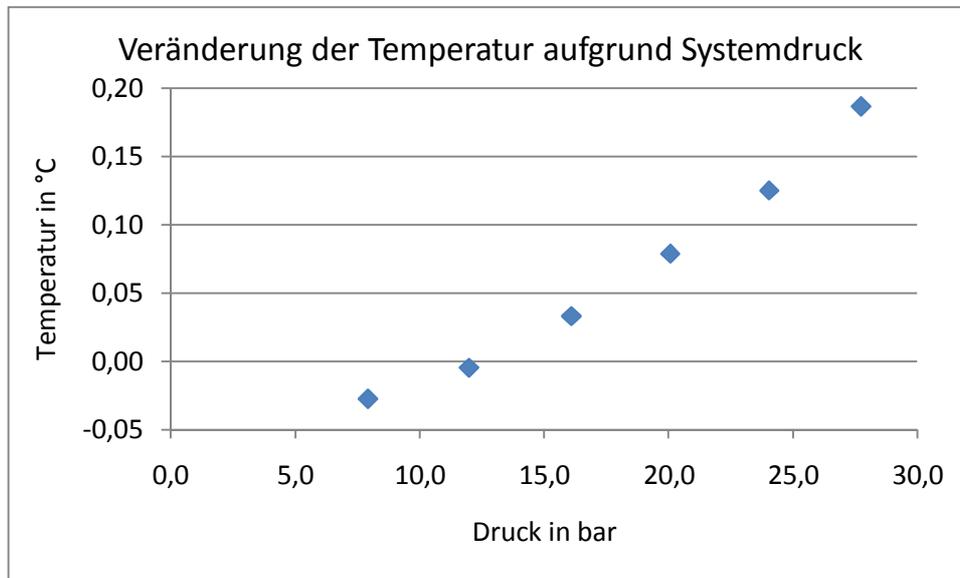


Abbildung 4-1 Abnahme der Temperatur durch Druckreduzierung im Messtand

Wie bereits erwähnt variiert die Schallgeschwindigkeit mit der Temperatur. Um es dennoch in einem Diagramm grafisch darzustellen, wurde mit dem gemessenen Druck und der gemessenen Temperatur die Schallgeschwindigkeit von R134a mit Refprop 9.0 (2010) errechnet. Dies führt zu einer Abweichung zwischen der gemessenen und der errechneten Schallgeschwindigkeit.

Auch wenn die Stoffwerte von Refprop 9.0 (2010) für R134a eine Messunsicherheit von bis zu 1 % aufweisen können, wurde vermutet, dass die Grenzen der möglichen Unsicherheit nicht innerhalb ein paar Zehntel Grad vorliegt. Mit dieser Überlegung wurde die Abweichung zur Refprop 9.0 (2010) zur grafischen Darstellung der Messergebnisse verwendet.

Die Ergebnisse der ersten Messung zeigen, dass die Ergebnisse innerhalb der angegebenen Unsicherheit liegen. Die Breite der Unsicherheit ist in Tabelle 4-3 dargestellt. In dieser Tabelle wird 1 % der Schallgeschwindigkeit von reinem R134a bei diversen Temperaturen und 30 bar angegeben.

Tabelle 4-3 Abweichungsmöglichkeit von Refprop bei R134a bei 30 bar

Temperatur in °C	Unsicherheit von a in m/s
3	±6,3
10	±6,0
30	±5,1
50	±4,2

Auch das Ergebnis der zweiten und dritten Messung ist innerhalb der Abweichungsmöglichkeit, wenn die Abbildungen 4-2 bis 4-4 mit der Tabelle 4-3 verglichen werden.

4. Messauswertung

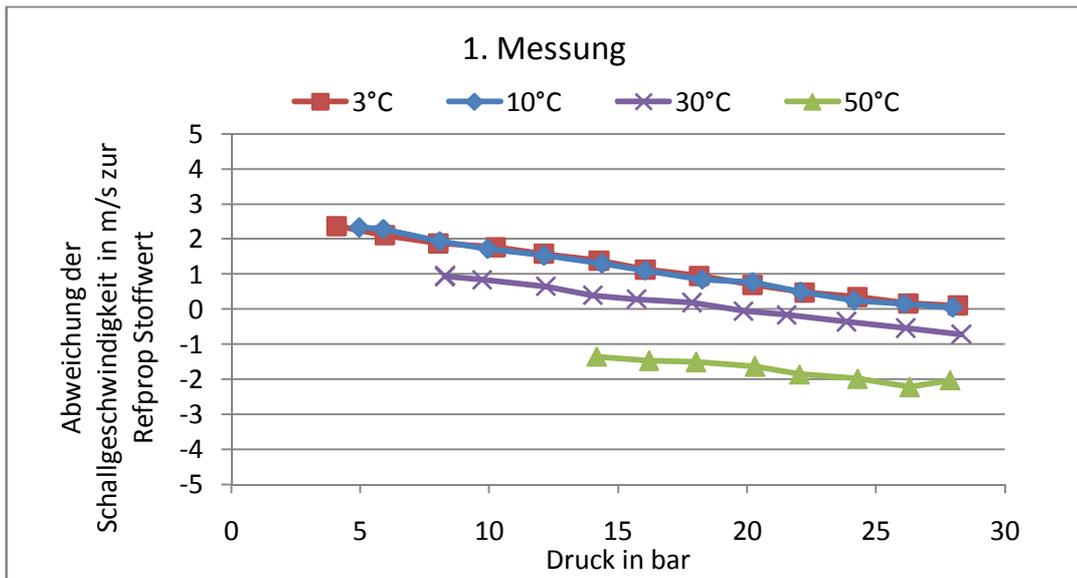


Abbildung 4-2 Ergebnis der ersten Messung von R134a

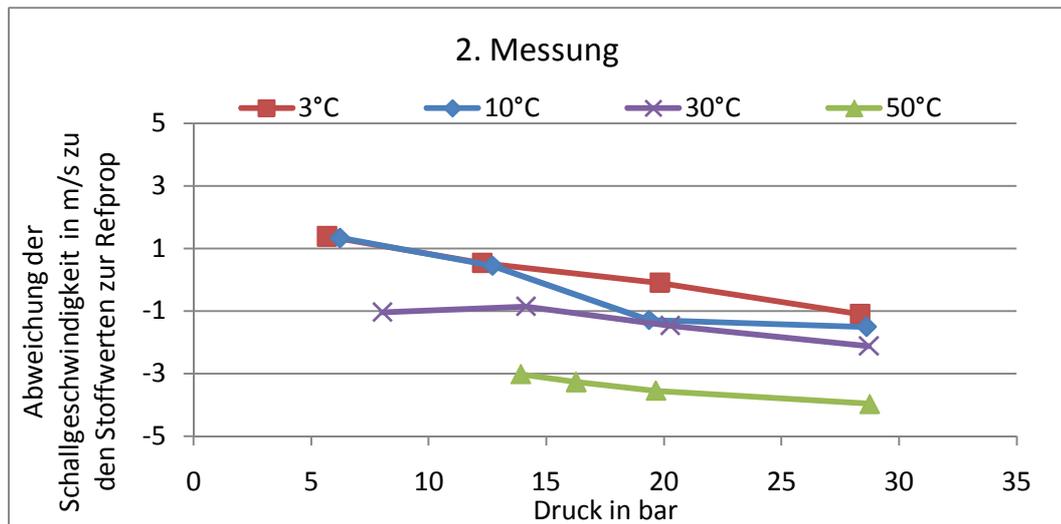


Abbildung 4-3 Ergebnis der zweiten Messung von R134a

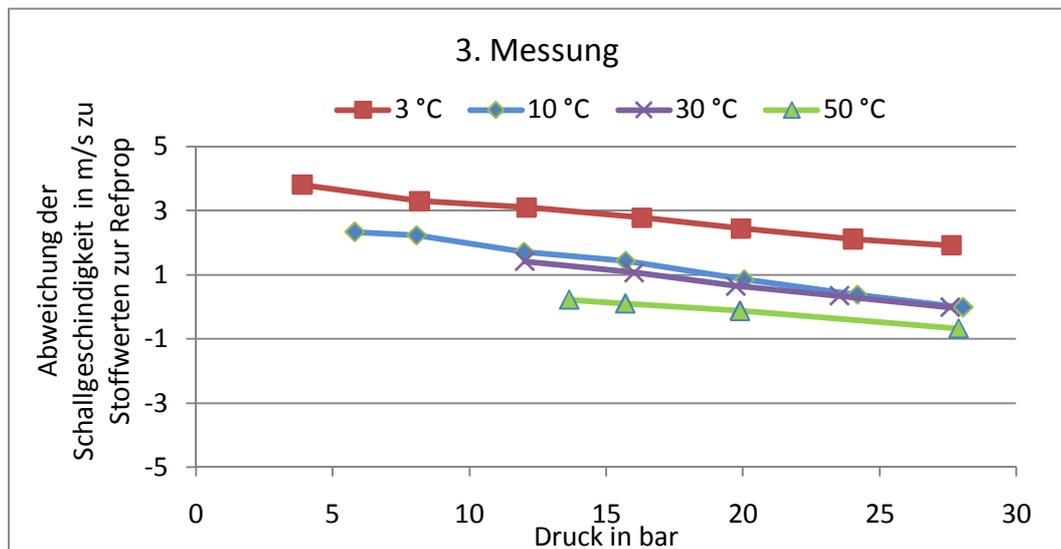


Abbildung 4-4 Ergebnis der dritten Messung von R134a

4. Messauswertung

Werden allerdings die drei Messungen untereinander verglichen (siehe Abbildung 4-5 bis Abbildung 4-8), zeigt sich, dass die dritte Messung die größte positive Abweichung zur Refprop 9.0 (2010) hat. Die zweite Messung zeigt die geringste Abweichung. Allerdings zeigen alle drei Messungen bei 50°C eine negative Abweichung.

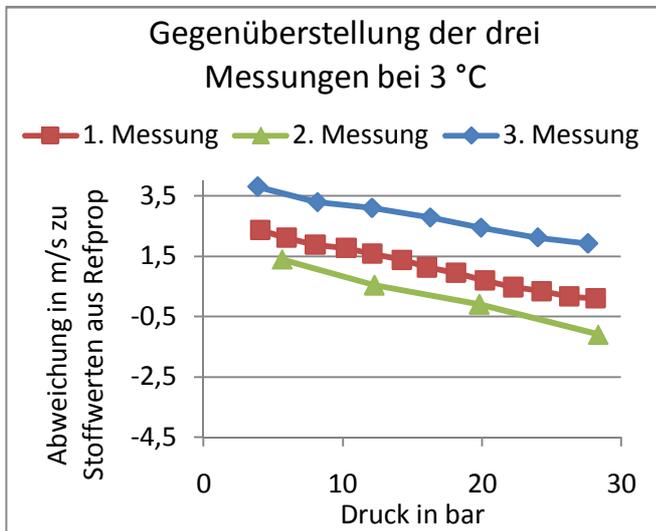


Abbildung 4-5 Gegenüberstellung der drei Messungen von R134a bei 3 °C

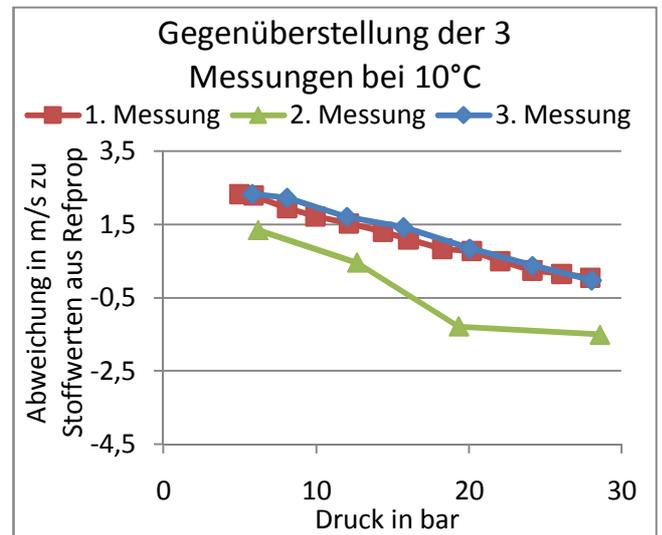


Abbildung 4-6 Gegenüberstellung der drei Messungen von R134a bei 10 °C

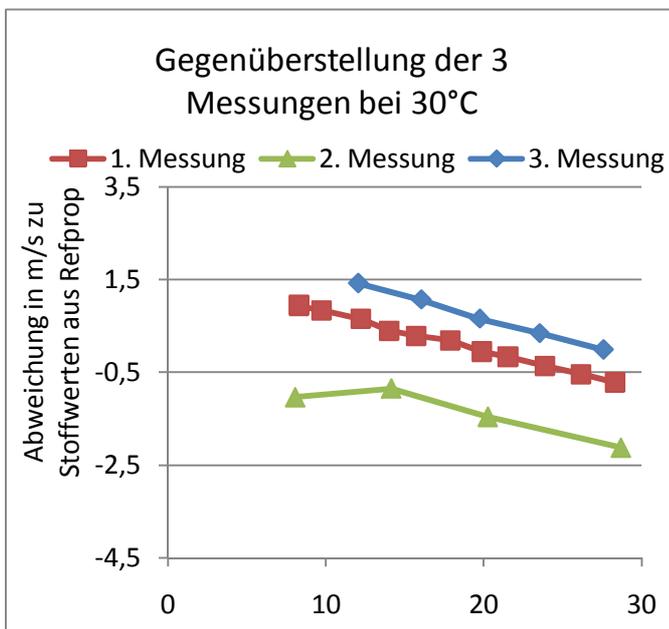


Abbildung 4-7 Gegenüberstellung der drei Messungen von R134a bei 30 °C

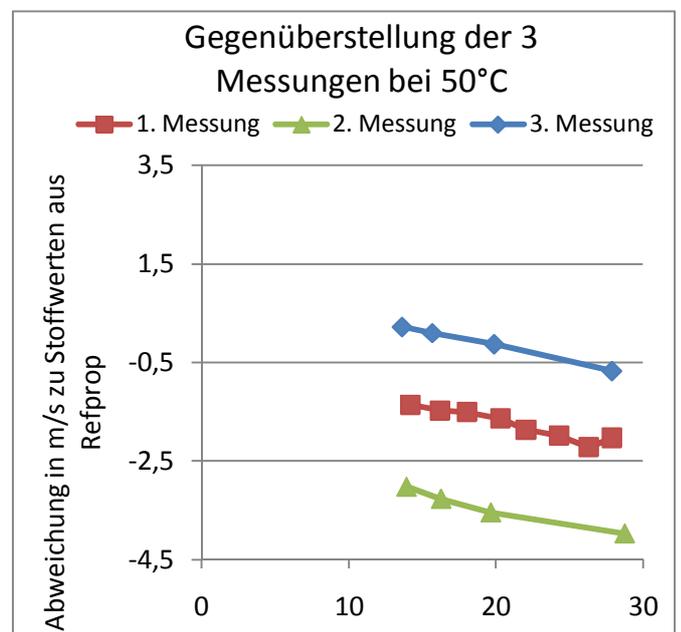


Abbildung 4-8 Gegenüberstellung der drei Messungen von R134a bei 50 °C

Nach der zweiten Messung wurde vermutet, dass sich noch Verunreinigungen im Messstand befanden, da die Schallgeschwindigkeit der zweiten Messung geringer als die der ersten Messung war. Ab diesem Zeitpunkt wurde noch mehr auf die Reinigung des Messstandes geachtet als zuvor. Da allerdings nach der dritten Messung die Schallgeschwindigkeit sogar höher lag als bei der ersten Messung, ließ dies nur den Entschluss zu, dass die Befüllung durch den Secu Smart (siehe Kapitel 3.3) nicht geeignet ist.

Zu diesem Zeitpunkt waren schon einige Messreihen bei unterschiedlichen Öl-Konzentrationen vermessen. Die dadurch erhaltenen Messpunkte werden im Kapitel 4.5.1 verwendet.

4.2 Reproduzierbarkeit der R134a_Messdaten

Aufgrund der Tatsache, dass alle Messungen mit Messunsicherheiten behaftet sind, die Schallgeschwindigkeiten aus Refprop 9.0 (2010) nicht als Referenz verwendet werden konnte, lange die Reproduzierbarkeit nicht gegeben war, wurden die beiden Temperaturmessungen (Schallsensor und PT100) erneut kalibriert (siehe Kapitel 3.2.4).

Hierbei zeigte sich, dass der Schallsensor, der bei Fa. „Anton Paar“ bereits kalibriert wurde, innerhalb der Toleranzen zum Kalibriergerät lag. Der PT100 zeigte trotz vorangegangener Kalibrierungen andere Temperaturen an. Aus diesem Grund wurde auf die Temperaturaufzeichnung des PT100 verzichtet.

Die Befüllung in den Befüllungsbehälter geschah am Anfang mit dem Kältemittel R134a durch den Secu Smart. Hier zeigte sich allerdings, dass die Schallgeschwindigkeiten des reinen „Kältemittels“ sich stark unterscheiden. Die Vermutung liegt nahe, dass die automatische Ölabscheidung des Geräts nicht einwandfrei funktionierte und somit vermutlich geringe Mengen an Öl in den Messstand gelangen.

Aus diesem Grund wurde ab diesem Zeitpunkt nur noch frisches Kältemittel aus einer Kältemittelflasche zur Befüllung verwendet.

Damit gab es eine Verbesserung der Reproduzierbarkeit, die mit folgender Vorgangsweise noch verfeinert werden sollte.

Es wurde versucht, einen Zustand (29 °C und 15 bar) möglichst exakt anzufahren und dabei unterschiedliche Variationen durchzuprobieren. In Tabelle 4-4 sind die Versuche aufgelistet, welche Einflüsse probiert wurden.

4. Messauswertung

Tabelle 4-4 Reproduzierung von R134a

Bezeichnung	rpm Pumpe	P in bar	a in m/s	T in °C	a lt. Refprop in m/s	Delta a zur Refprop in m/s	Füllung ftl. Nr.	Datum der Messung	Messdauer in min
Rep. 1	20	14,99	497,59	29,02	496,81	0,78	1,00	Do 3.2	1
Rep. 2	20	14,99	492,64	30,02	492,01	0,63	1,00	Do 3.2	1
Rep. 3	20	15,01	488,19	30,99	487,40	0,79	1,00	Do 3.2	1
Rep. 4	15	15,00	497,57	29,03	496,78	0,79	1,00	Do 3.2	1
Rep. 5	15	15,02	493,05	29,97	492,29	0,76	1,00	Do 3.2	1
Rep. 6	15	15,03	487,87	31,05	487,13	0,74	1,00	Do 3.2	1
Rep. 7	10	15,00	497,56	29,01	496,87	0,68	1,00	Do 3.2	1
Rep. 8	10	15,01	493,03	29,98	492,25	0,78	1,00	Do 3.2	1
Rep. 9	10	15,02	487,86	31,01	487,30	0,56	1,00	Do 3.2	1
Rep. 10	5	15,00	497,49	28,99	496,98	0,51	1,00	Do 3.2	1
Rep. 11	5	14,99	492,52	30,00	492,13	0,39	1,00	Do 3.2	1
Rep. 12	5	15,00	487,51	31,01	487,27	0,24	1,00	Do 3.2	1
Rep. 13	15	15,03	498,08	29,00	496,96	1,12	2,00	Do 3.2	1
Rep. 14	15	14,99	493,29	29,96	492,29	1,00	2,00	Do 3.2	1
Rep. 15	15	14,99	488,37	31,01	487,25	1,12	2,00	Do 3.2	1
Rep. 16	15	15,01	497,36	29,01	496,88	0,47	2,00	Fr 4.2	1
Rep. 17	15	15,01	497,13	29,09	496,51	0,62	2,00	Fr 4.2	25
Rep. 18	15	15,02	497,60	29,00	496,93	0,67	2,00	Fr 4.2	15
Rep. 19	15	15,00	497,56	29,00	496,93	0,62	2,00	Fr Ein/Aus 4.2	1
Rep. 20	15	14,98	497,43	29,03	496,74	0,70	2,00	Fr Ein/Aus 4.2	30
Rep. 21	15	15,02	498,03	29,02	496,83	1,20	3,00	Fr 4.2	1
Rep. 22	15	14,99	496,84	29,01	496,87	-0,04	3,00	Mo 7.2	1
Rep. 23	15	15,00	496,85	29,02	496,83	0,03	3,00	Mo 7.2	5
Rep. 24	15	15,01	496,11	29,01	496,86	-0,75	3,00	Di 8.2	1
Rep. 25	15	14,99	497,87	29,03	496,75	1,12	4,00	Di 8.2	1
Rep. 26	15	15,03	497,80	29,03	496,80	1,00	4,00	Mi 9.2	1

4. Messauswertung

Folgende möglichen Einflüsse wurden mit reinem R134a kontrolliert:

- Veränderung der Pumpendrehzahl
- Laufdauer beim Vermessen eines Messpunktes
- Aus/Einschalten des Messstandes
- Etliche neue Befüllungen aus frischer Kältemittelflasche

Es konnte bei diesen Versuchen kein Einfluss auf Schallgeschwindigkeit festgestellt werden.

Allerdings zeigte eine längere Verweildauer des Kältemittels im Prüfstand eine abnehmende Schallgeschwindigkeit mit fortschreitender Zeit.

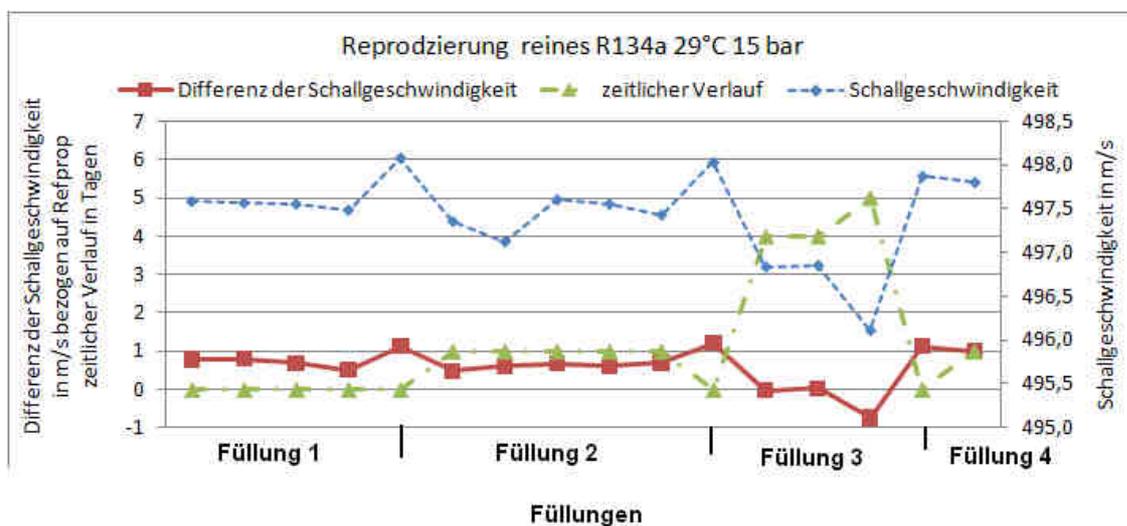


Abbildung 4-9 Abnahme der Schallgeschwindigkeit im Verlauf der Zeit

In Abbildung 4-9 sind drei Linien über den vier Füllungen eingezeichnet. Bei der Reproduzierbarkeit wurde der Messstand insgesamt vier Mal neu befüllt. Bei jeder Füllung wurden mehrere Versuche durchgeführt. Dies sollte Aufklärung darüber geben, welche äußeren Einflüsse die Messwerte beeinflussen. Die Linie „Differenz der Schallgeschwindigkeit“ gibt an, wie groß die Schallgeschwindigkeit im Vergleich zur Refprop 9.0 (2010) ist. Die Linie „Schallgeschwindigkeit“ gibt die gemessene Schallgeschwindigkeit an. Die Linie „zeitlicher Verlauf“ gibt an, wie viele Tage zwischen den einzelnen Messungen verstrichen sind bzw. wie lange jede Füllung im Messstand verweilt. Das bedeutet, dass sich die erste Füllung nur einen Tag im Messstand befand. Bei der Füllung zwei wurde die erste Messung am Tag der Befüllung durchgeführt, die anderen fünf am nächsten Tag. Bei Füllung Nummer drei wurde die erste Messung am Tag der Befüllung durchgeführt, die darauffolgende Messung mit der gleichen Füllung erst 4 Tage später.

Es ist zu erkennen, dass jeweils mit den Füllungen von 2 bis 4 (siehe Tabelle 4-4 Messpunkte Rep.13, Rep.21, und Rep.25) die Schallgeschwindigkeiten maximal 0,21 m/s auseinander liegen. Auch die Abweichung zur Refprop 9.0 (2010) liegt innerhalb von 0,21 m/s.

Allerdings zeigt sich, dass die Schallgeschwindigkeit abnimmt je länger sich die Füllung im Messstand befindet. Bei der Messung der dritten Füllung hat die Schallgeschwindigkeit über die Zeitdauer von fünf Tagen um 1,9 m/s abgenommen (vgl. siehe Tabelle 4-4 Messpunkte Rep.21, und Rep.24).

Da die Schallgeschwindigkeit mit der Zeit abnimmt, und Stickstoff eine geringere Schallgeschwindigkeit als das Kältemittel besitzt, wurde vermutet, dass durch die Membran Stickstoff durch ein winziges Loch oder direkt durch die Membran diffundiert. Daher wurde vor der 4. Füllung die Membran gewechselt und zusätzlich eine zweite hinzugegeben. Die Schallgeschwindigkeit sank damit deutlich weniger (vgl. in Tabelle 4-4 Punkte Rep.25 und Rep.26)

Befänden sich Öl-Verunreinigungen in einem mit Leckagen behafteten Messstand, müsste die Schallgeschwindigkeit mit der Zeit zunehmen: Träte Kältemittel aus, müsste die Konzentration steigen, was zu einer höheren Schallgeschwindigkeit führen würde.

Der Zeitdruck für die Vermessung des ersten Öl/Kältemittel-Gemisches ermöglichte lediglich, einen Punkt zu kontrollieren (vgl. Tabelle 4-4 Rep. 26 mit Rep. 25). Das Ergebnis zeigte nahezu keine „Schallgeschwindigkeitsreduktion“ und aus diesem Grund wurde angenommen, dass das Problem gelöst sei.

4.3 Messergebnisse reines R1234yf

Für die erste Messung von R1234yf wurde wieder der Vergleich mit den Stoffwerten aus Refprop 9.0 (2010) gemacht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-10 dargestellt.

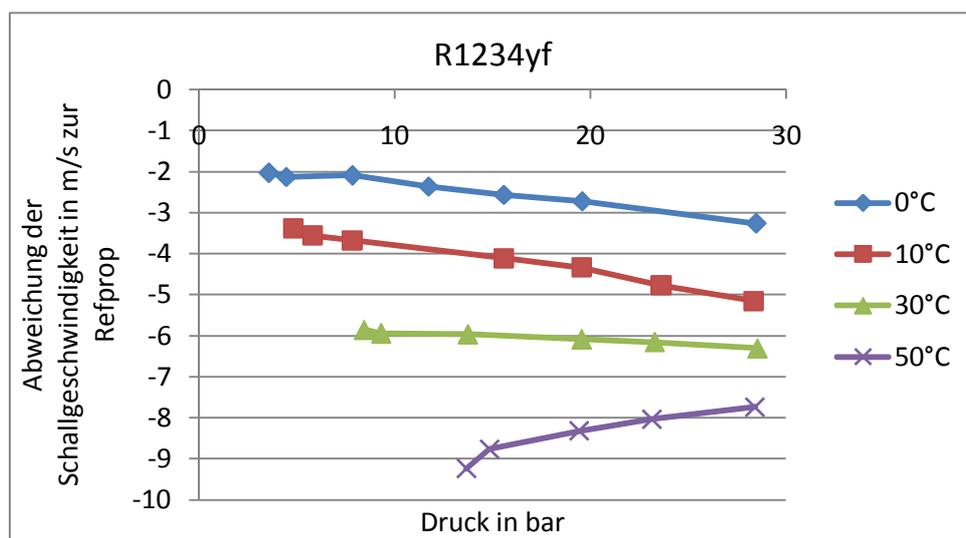


Abbildung 4-10 Schallgeschwindigkeitsabweichung von R1234yf zur Refprop

Die Abweichung der gemessenen Schallgeschwindigkeit ist um ein vielfaches höher als bei R134a, obwohl die Unsicherheit aus Refprop 9.0 (2010) für flüssiges R1234yf mit 0,5 % angegeben ist.

Tabelle 4-5 Angegebene Unsicherheit von Refprop für R1234yf und 30 bar

Temperatur in °C	Unsicherheit von a in m/s
0	±2,9
10	±2,7
30	±2,3
50	±1,9

Die Befüllung erfolgte bei diesem Kältemittel genau gleich wie bei R134a. Die gemessene Schallgeschwindigkeit ist geringer als die aus den Stoffwerten. Öl kann dafür nicht die Ursache sein, da Verunreinigungen durch Öl die Schallgeschwindigkeit erhöhen würden. Tabelle 4-4 zeigt die Unsicherheit von R1234yf bei unterschiedlichen Temperaturen und 30 bar.

Die Abweichung könnte folgende Ursachen haben:

- Die Schallgeschwindigkeit in der Stoffdatenbank ist falsch. Es ist merkwürdig, dass für das neue Kältemittel eine geringere Unsicherheit angegeben ist, als das derzeitig verwendete Kältemittel R134a.
- In der Kältemittelflasche vom Hersteller befand sich nicht reines R1234yf.
- Ein oder mehrere Messgeräte haben nicht die angegebene Genauigkeit.

Da die gemessene Schallgeschwindigkeit bei R134a innerhalb der Unsicherheit liegt, dies allerdings beim R1234yf nicht mehr der Fall ist, wird die Schallgeschwindigkeit in der Stoffdatenbank als falsch gedeutet. Weitere Vergleiche werden deshalb nicht mehr mit Refprop 9.0 (2010) durchgeführt.

4.4 Reproduzierbarkeit der R1234yf Messdaten

Als die erste Messung von R1234yf mit dem anonymen Öl 1 fertig war, wurde die Reproduzierbarkeit von reinem R1234yf überprüft. In Abbildung 4-11 sind die Ergebnisse dargestellt.

Die erste Messung musste möglichst schnell abgeschlossen sein, da ein Kunde die Ergebnisse benötigte. Aus diesem Grund wurde nicht gasförmig aus dem Befüllungsbehälter, sondern mit der flüssigen Phase befüllt.

Es stellte sich heraus, dass bei der zweiten Messung das reine Kältemittel R1234yf eine deutlich niedrigere Schallgeschwindigkeit aufwies als bei der ersten. Zu diesem Zeitpunkt wurde angenommen, dass sich trotz intensiver Reinigung vor der ersten Messung des Messstandes Öl eingeschlichen hat. Bei der zweiten Messung wurde der Messstand nur mit der gasförmigen Phase befüllt. Diese Befüllung soll sicherstellen, dass evtl. Verunreinigungen im Befüllungsbehälter zurück bleiben. Dies hätte die höhere Schallgeschwindigkeit der ersten Messung gegenüber der zweiten erklärt.

4. Messauswertung

Messung Nummer drei erfolgte erst vier Tage später mit der der gleichen Füllung wie bei Messung zwei. Es stellte sich heraus, dass die Schallgeschwindigkeit erneut gesunken war. Somit tauchte das bereits gelöst geglaubte Problem (vgl. 4.2) wieder auf.

Bei der vierten Messung wurde der Messtand erneut entleert und wieder mit neuem Kältemittel gasförmig befüllt. Nun zeigte sich allerdings wieder eine Schallgeschwindigkeit, die näher an der ersten Messung war. Diese Messung zeigte wieder eine höhere Schallgeschwindigkeit, als die Messungen mit der zweiten Füllung.

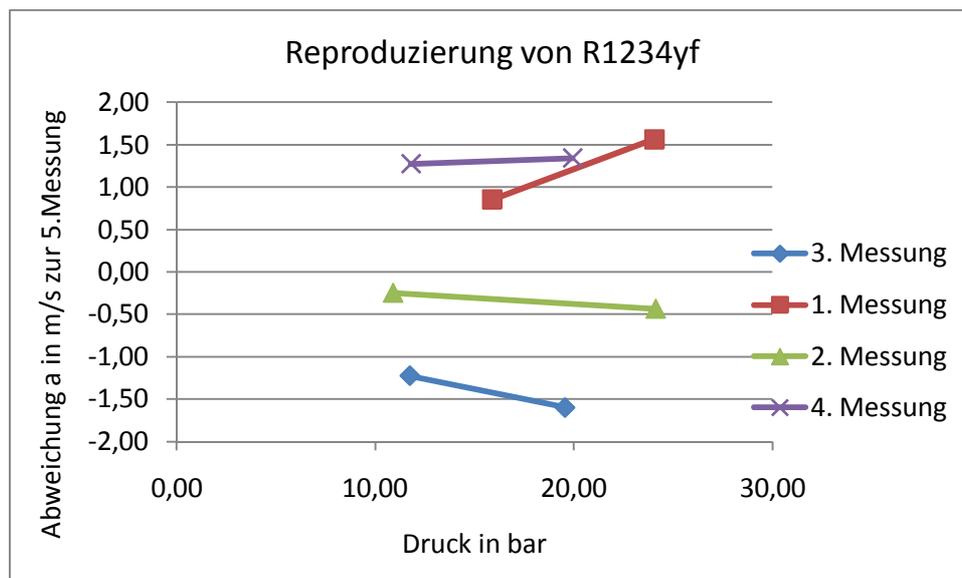


Abbildung 4-11 Reproduzierung R1234yf

Aus diesem Grund wurde eine fünfte Messung (Referenzmessung), wieder mit einer neuen Füllung, durchgeführt, bei der versucht wurde je zwei Punkte der vorangegangenen Messungen so gut wie möglich in Druck und Temperatur anzunähern.

Das Ergebnis dieser Messung befand sich in der Mitte der ersten vier Messungen. Es zeigt, dass die zweite Messung relativ nahe an der Referenzmessung liegt. Allerdings wurde sowohl bei der zweiten als auch bei der vierten Messung auf höchste Sauberkeit geachtet.

Abbildung 4-11 zeigt, dass die erste Messung im Vergleich zur Referenzmessung bei ca. 15,88 bar und 2,23 °C (vgl. Tabelle 4-6 Messpunkt R_R1234_2) eine um 0,85 m/s höhere Schallgeschwindigkeit hatte. Tabelle 4-6 gibt die Messergebnisse der Referenzmessung und den ausgewählten Punkten der Messung eins bis vier wieder.

Wäre die Schallgeschwindigkeit von der vierten Messung nicht höher als bei der zweiten Messung gewesen, wäre lediglich das Problem der fallenden Schallgeschwindigkeit ungelöst.

4. Messauswertung

Da die vierte Messung allerdings trotz gasförmiger Befüllung wieder eine höhere Schallgeschwindigkeit aufwies, ist die Vermessung von Öl/Kältemittel-Gemischen an einem Punkt angelangt, an dem es derzeit keine Idee für mögliche Ursachen gibt. Eine Abweichung von ungefähr $\pm 1,5$ m/s würde bei der Bestimmung des OCR Gehalts, eine Abweichung von $\pm 0,29$ %-Punkte in OCR bedeuten. Dieser Zusammenhang ergibt sich durch den Koeffizienten k im Kapitel 4.5.2.

Tabelle 4-6 Ergebnis der Referenz Messung von R1234yf

Messungsnummer	p in bar	a in m/s	T in °C	5. Messung Referenzmessung				
				Bezeichnung	p in bar	a in m/s	T in °C	Δa^* in m/s
1. Messung	24,05	566,44	2,76	R_R1234_1	24,02	564,88	2,76	1,56
	15,88	560,63	2,27	R_R1234_2	15,88	559,78	2,23	0,85
2. Messung	24,11	577,73	-0,16	R_R1234_3	24,11	578,16	-0,14	-0,43
	10,90	566,68	-0,38	R_R1234_4	10,88	566,93	-0,36	-0,25
3. Messung	19,57	577,83	-1,23	R_R1234_5	19,44	579,43	-1,20	-1,60
	11,74	571,36	-1,38	R_R1234_6	11,75	572,58	-1,36	-1,22
4. Messung	19,94	573,81	0,28	R_R1234_7	19,93	572,47	0,30	1,34
	11,81	567,84	-0,09	R_R1234_8	11,81	566,57	-0,08	1,27

* Differenz der Schallgeschwindigkeiten (x-Messung - 5.Messung)

Da keine Erklärung für die Abweichung gefunden werden konnte wurde mit der Vermessung des Öl1/R1234yf-Gemisches fortgefahren.

4.5 Ausgleichskurve

In diesem Punkt soll eine Funktion für den OCR-Gehalt gefunden werden, die es ermöglicht den OCR-Wert aus der gemessenen Schallgeschwindigkeit, dem Druck und der Temperatur zu ermitteln.

$$\text{OCR} = f(a, p, T)$$

Da nur eine endliche Anzahl an Messpunkten erfasst werden kann, ist es nötig, eine Funktion zu finden, mit denen jeder beliebige Punkt innerhalb gewisser Grenzen errechnet werden kann.

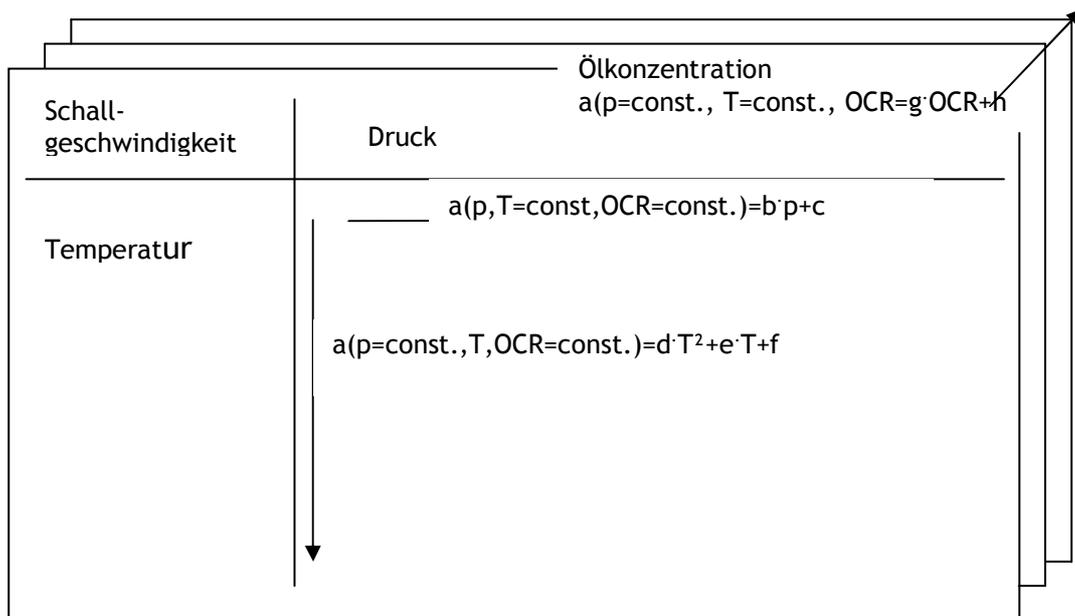


Abbildung 4-12 Abhängigkeiten der Schallgeschwindigkeit

In Abbildung 4-12 sind die Abhängigkeiten von einem Öl/Kältemittel-Gemisch, wie unter 2.3 erläutert, aufgelistet. Durch Überprüfen diverser Funktionen hat sich allerdings herausgestellt, dass die geringste durchschnittliche Abweichung und auch die einzelne maximal Abweichung für $\text{OCR} = 0\%$, d.h. zur Beschreibung der gemessenen Schallgeschwindigkeiten des reinen Kältemittels, die Form nach (Gl. 4-1) hat. Diese Form unterscheidet sich von Ahnefeld et al. (1996) die lediglich von einem quadratischen Einfluss der Temperatur und linearen Einfluss des Druckes berichten.

$$a_{KM} = \sqrt{a \cdot p + b \cdot T^3 + c \cdot T^2 + d \cdot T + e \cdot T \cdot p + f \cdot p \cdot T^2 + g} \quad (\text{Gl. 4-1})$$

T in °C p in bar a_{KM} in m/s

Da die Schallgeschwindigkeit wie unter Punkt 2.3.2 beschrieben linear vom Druck und der Temperatur abhängig ist, aber die Terme mit den Koeffizienten „e,f,c“ die Annäherung verbesserten, werden diese Terme auch für die Ausgleichskurve verwendet. Mittels der gezogenen Wurzel kam es zu einer noch besseren Annäherung.

Durch höhere Potenzen konnten mittels Umetrics MODDE 9. keine besseren Ergebnisse erzielt werden.

Wie die Veränderung durch das Öl auf die Schallgeschwindigkeit vonstattengeht, wurde bereits in Kapitel 2.4 diskutiert. Somit wurde eine Ausgleichskurve für die Schallgeschwindigkeit wie unter (Gl. 4-2) beschrieben gewählt.

$$a_{gemisch} = a_{KM} + \text{OCR} \cdot h \cdot T + \text{OCR} \cdot i \cdot p + \text{OCR} \cdot k \quad (\text{Gl. 4-2})$$

4. Messauswertung

a_{KM} aus (Gl. 4-1)

T in °C

P in bar

a_{KM} und $a_{gemisch}$ in m/s

OCR in %

Mit den Messpunkten des reinen Kältemittels wurden mittels Umetrics MODDE9.0 die Koeffizienten bestimmt. Mit den Messpunkten, die eine Ölkonzentration aufweisen, sind die Koeffizienten aus (Gl. 4-2) bestimmt worden. Wird diese Gleichung auf „OCR“ umgeformt, folgt (GL. 4-3).

$$OCR = \frac{a_{gemisch} - \sqrt{a \cdot p + b \cdot T^3 + c \cdot T^2 + d \cdot T + e \cdot T \cdot p + f \cdot p \cdot T^2 + g}}{h \cdot T + i \cdot p + k} \quad (GL. 4-3)$$

Es zeigte sich, dass bei der Vermessung des reinen Kältemittels die Schallgeschwindigkeit mit den Stoffwerten aus Refprop 9.0 (2010) sich nicht decken. Auch wurde nicht ein konstanter Offset Fehler festgestellt. Dadurch können die Stoffwerte aus Refprop 9.0 (2010) für die Bestimmung der Koeffizienten aus (Gl. 4-1) nicht herangezogen werden, da ansonsten die Schallgeschwindigkeiten des reinen Kältemittel bei einem anderen Wert starten. Auf diesen Startwert wird allerdings für die Berechnung der Ölkonzentration aufgebaut.

Der Versuch, eine Näherungsfunktion mit möglichst vielen Faktoren zu erzeugen (z.B. nach der Form von (GL. 4-4), kann theoretisch auch eine gute Annäherung an die vorhandenen Messdaten für ein Öl/Kältemittel-Gemisch erbringen. Allerdings wurde bei dem Versuch eine solche Annäherung nicht gefunden.

Zusätzlich stellt sich die Frage wie genau die gemessenen Werte getroffen werden sollen bzw. wie exakt sich die Funktion an jeden einzelnen Messwert aufgrund von Messunsicherheiten annähern muss. Auch haben Versuche gezeigt, dass die derzeitige Funktion, der Form, nach der (GL. 4-4), zu nicht plausiblen Ergebnissen geführt haben.

In Abbildung 4-13 wird dargestellt, wie es mit einer ungeeignete Ausgleichsfunktion zu einem falschen Verlauf der Funktion kommen kann. Dabei wurden fiktive Messergebnisse erstellt, welche mit einer Ausgleichsfunktion angenäher werden sollen. Obwohl die Funktion alle fiktiven Messwerte genau trifft, scheint der Verlauf nicht glaubwürdig.

$$OCR = a \cdot T^3 + b \cdot T^2 + c \cdot T + d \cdot a^3 + e \cdot a^2 + f \cdot a + g \cdot p^3 + h \cdot p^2 + i \cdot p + j \quad (GL. 4-4)$$

T in °C

p in bar

a in m/s

OCR in %

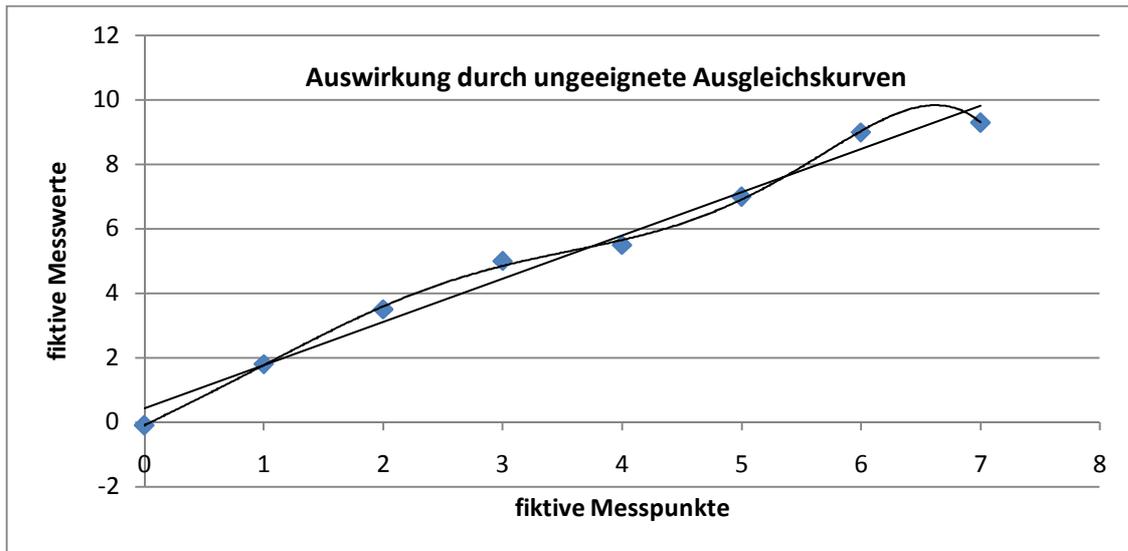


Abbildung 4-13 Auswirkung ungeeigneter Ausgleichsformen

4.5.1 Ausgleichskurve für R134a und Öl A

Da die Vermessung des Öl/Kältemittel-Gemisches einen großen finanziellen Aufwand bedeutet, wird die genaue Bezeichnung des Öles geheim gehalten.

Es sei angemerkt, dass zum jetzigen Zeitpunkt noch keine absolut vertrauenswürdigen Ergebnisse für dieses Öl A/R134a-Gemisch vorliegen, da die Vermessung von R1234yf mit Öl 1 eines Kunden Vorrang hatte. Die für die Ausgleichskurve verwendeten Messdaten sind in Tabelle 10-1 dargestellt.

Aus diesem Grund wurden die gesamten derzeit vorliegenden Messdaten für R134a und Öl A ausgewertet, mit dem Wissen, dass diese Messwerte untereinander große Abweichungen aufweisen (vgl. 4.1).

4. Messauswertung

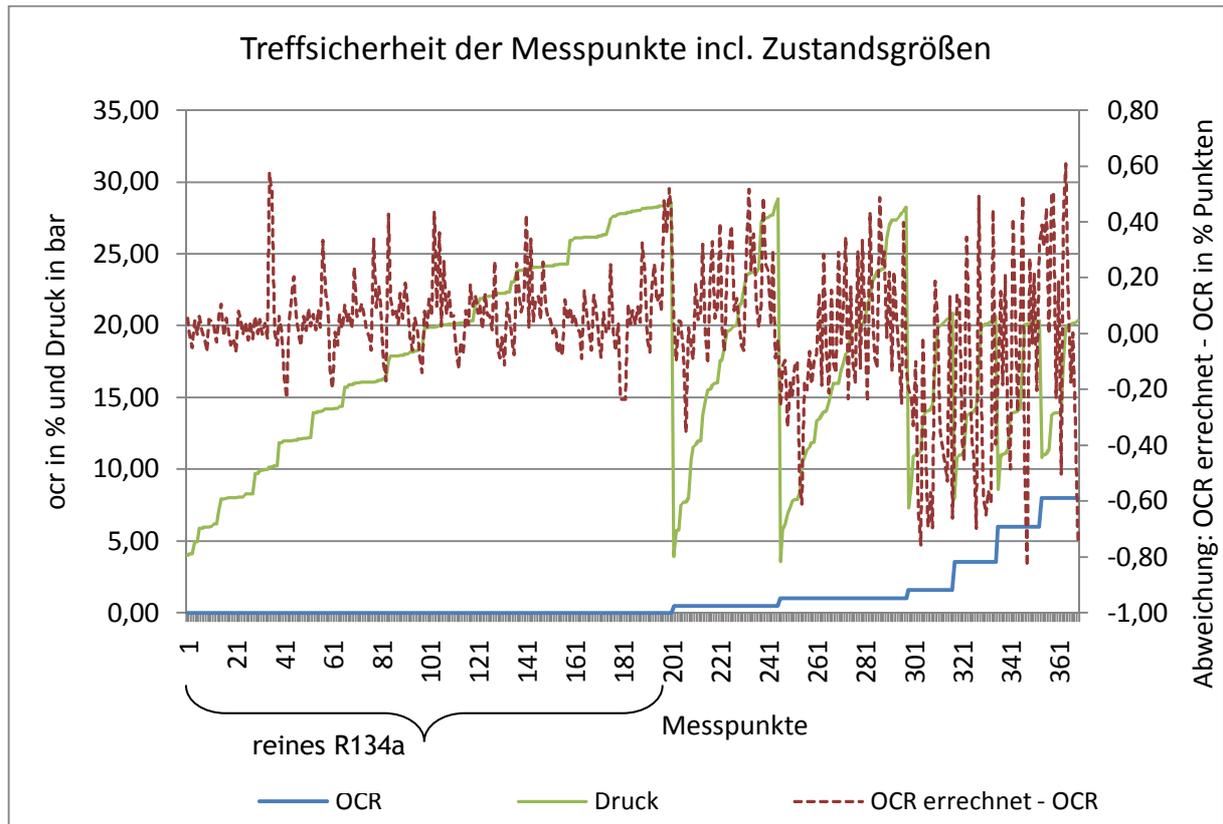


Abbildung 4-14 Treffsicherheit der Messpunkte inkl. Druck von R134a/Öl A

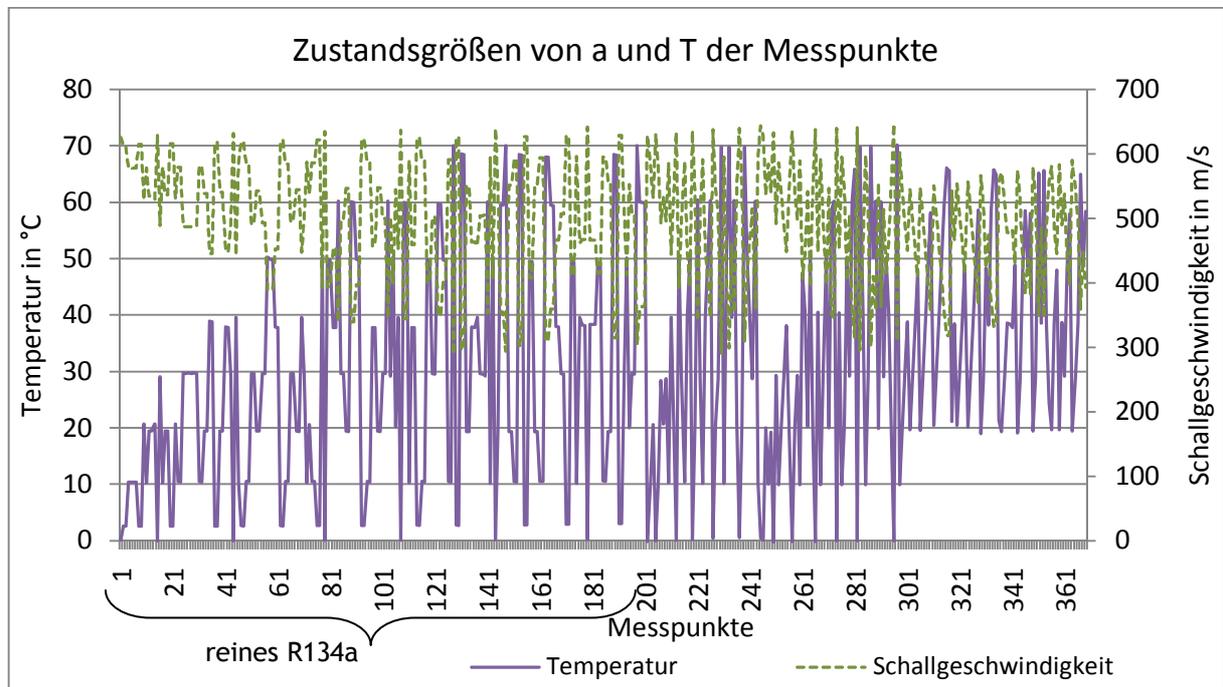


Abbildung 4-15 T und a der Messpunkte von R134a/Öl A

Abbildung 4-14 zeigt, wie gut die gemessenen Messpunkte mit dem gefunden Polynom (GL. 4-3) zusammenfallen. In dieser Abbildung ist auch der herrschende Druck der einzelnen Messdaten aufgetragen. Der erste Messpunkt R134_001 (links

4. Messauswertung

außen) hat einen Druck von weniger als 5 bar, einen OCR von 0 % und die Ausgleichsfunktion gibt eine Differenz zu dem tatsächlichen OCR Wert (0 %) von 0,01 % Punkten aus.

Diese Werte wurden aus Abbildung 4-14 entnommen. Die genauen Angaben befinden sich in der Tabelle 10-1.

Abbildung 4-15 zeigt die zwei weiteren gemessenen Zustandsgrößen (Schallgeschwindigkeit und Temperatur). Die Schallgeschwindigkeit vom ersten Messpunkt R134a_001 beträgt etwas über 600 m/s und die Temperatur ca. 0°C. Auch hier sei auf die Tabelle 10-2 für die genauen Messwerte verwiesen.

Dabei haben diese Messpunkte noch keinen Anspruch auf eine ausreichende Genauigkeit. Wie im Kapitel 4.1 für das reine Kältemittel R134a bereits diskutiert wurde, gab es Abweichungen der Schallgeschwindigkeiten vom reinen Kältemittel bei unterschiedlichen Messungen, aber bei gleichen Temperaturen und Drücken. Dies stellt jedoch wie erwähnt den Ausgangswert für die errechnete Ölkonzentration dar. Da mit unterschiedlichen „Startwerten“ für reines R134a unterschiedliche Ölkonzentrationen vermessen wurden, lässt sich kein ausreichend genaues Polynom finden.

Die Form des Polynoms unterhalb nochmals dargestellt.

$$OCR = \frac{a_{gemischt} - \sqrt{a \cdot p + b \cdot T^3 + c \cdot T^2 + d \cdot T + e \cdot T \cdot p + f \cdot p \cdot T^2 + g}}{h \cdot T + i \cdot p + k} \quad (GL. 4-3)$$

T in °C p in bar a_{gemischt} in m/s OCR in %

Dabei handelt es sich bei a_{gemischt}, T und p um die gemessenen Werte im Prüfstand.

Die Koeffizienten für dieses Polynom lauten für den Gültigkeitsbereich von	
Temperaturbereich	0-70 °C
Druckbereich	4 - 28 bar:
OCR Bereich	0 - 8%
Aggregatzustand	flüssig, vollkommene Mischbarkeit

a= 940,655
b= -0,055871
c= 18,5917
d= -5858,71
e= 0,459573
f= 0,11473
g= 387010
h= 0,01379952
i= -0,00994914
k= 4,93540096

Die Koeffizienten h und i sind relativ klein. Das bedeutet, dass die Ölkonzentration wie bereits im Punkt 2.4 erwähnt, fast nur eine Offsetanhebung zur Folge hat.

Dieses Offset macht sich beim Koeffizienten k bemerkbar. Durch ein Prozent OCR kommt es mit Öl A zu einer Schallgeschwindigkeitsänderung von etwa 4,93 m/s.

Mit diesen Messreihen konnte keine zuverlässige Ausgleichskurve gefunden werden. Das macht sich in der Abbildung 4-14 bemerkbar. Bei großen OCR Gehalten ab 4 % liegt die Abweichung zwischen den errechneten OCR Gehalt durch das Polynom aus (GL. 4-3) bei $\pm 0,6\%$ -Punkten. Es zeigt lediglich die Tendenz der Schallgeschwindigkeitsveränderungen durch das OCR. Mit einer zuverlässigen Ausgleichsfunktion für das reine R134a könnte sich ggf. bereits eine bessere Vorhersage für zukünftige Messungen von R134a und Öl A ergeben.

4.5.2 Ausgleichskurve für R1234yf und Öl 1.

Die Messung mit denen eine Ausgleichskurve für 0 bis 8 % OCR ermittelt wurde, sind in Kapitel 10.2 aufgelistet.

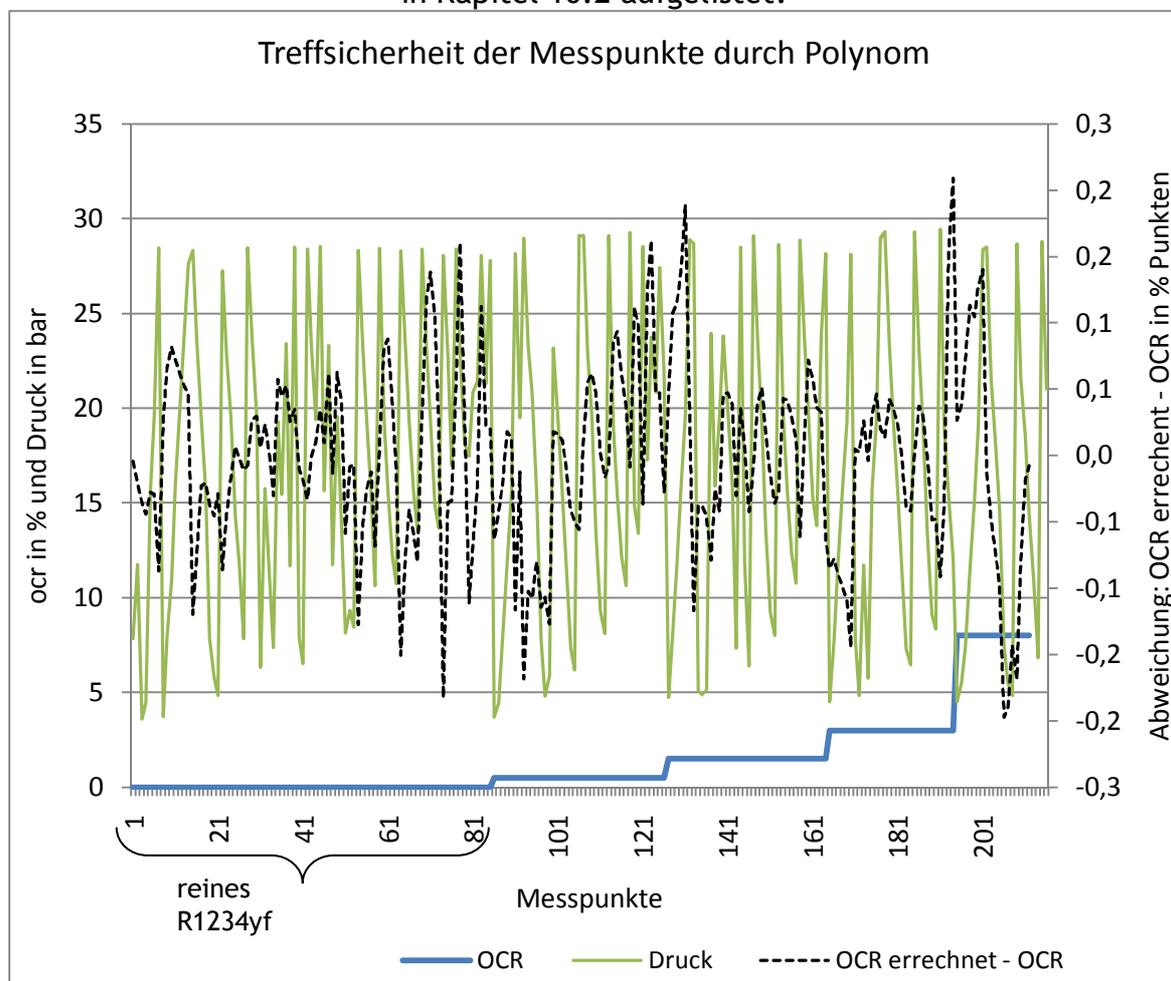


Abbildung 4-16 Treffsicherheit der Messpunkte inkl. Druck bei R1234yf/Öl1

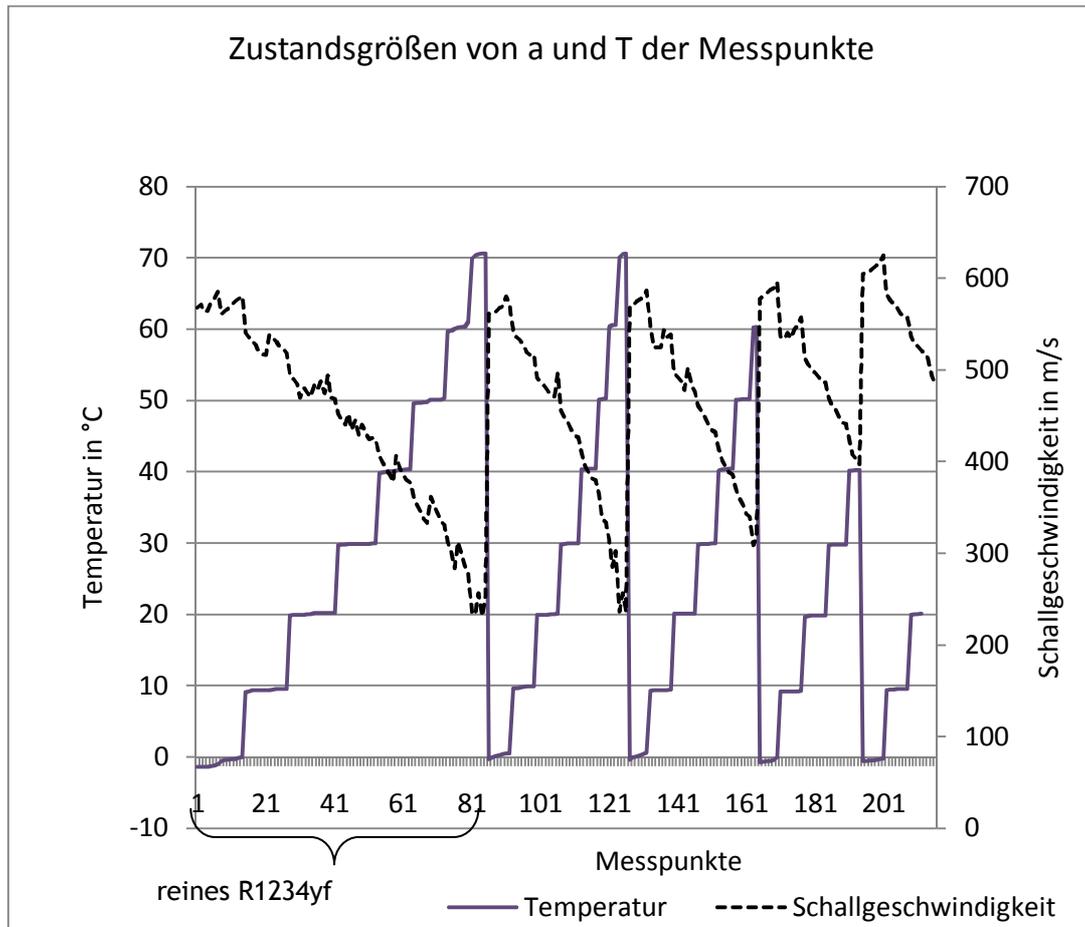


Abbildung 4-17 Zustandsgrößen von a und T bei R1234yf und Öl 1

Die Funktion zur Beschreibung des OCR Gehaltes dieser Messpunkte ist in (GL. 4-3) dargestellt.

Die Koeffizienten für dieses Polynom lauten für den Gültigkeitsbereich von

Temperaturbereich	0-70 °C
Druckbereich	4 - 28 bar:
OCR Bereich	0 - 8%
Aggregatzustand	flüssig, vollkommene Mischbarkeit

- a= 1056,07
- b= -0,0709191
- c= 18,3613
- d= -5052,8
- e= -0,207067
- f= 0,134533
- g= 307166
- h= 0,00125473
- i= -0,00858604
- k= 5,51263717

Abbildung 4-16 zeigt die Abweichung mittels des Polynoms und des tatsächlichen OCRs. Diese Werte befinden sich zwischen -0,2 und +0,2 %. Dieser Wert ist bei

höheren Ölkonzentrationen sicherlich akzeptabel, allerdings bei geringeren Ölkonzentrationen von 0-1 % nicht.

In Abbildung 4-17 sind Temperatur und Schallgeschwindigkeit der Messpunkte eingetragen.

So ergibt sich aus der Abbildung 4-16 für den ganz linken Messpunkt R1234_1, dass der Druck in etwa bei 7 bar, der tatsächliche OCR bei 0 %, die Abweichung zwischen dem errechneten und dem tatsächlichen OCR bei 0,0 %-Punkten lag.

Aus Abbildung 4-17 kann entnommen werden, dass die Temperatur für den Messpunkt R1234_1 bei etwa 0 °C und die Schallgeschwindigkeit bei ca. 570 m/s lag.

4.6 Entmischung von Öl A im Kältemittel R1234yf

Bei der Vermessung mit diesem Öl wurden Mischungslücken festgestellt. Dies machte sich an der Anzeige während der Messung bemerkbar. Eine starke Entmischung zeigte sich darin, dass die Schallgeschwindigkeit nicht mehr annähernd konstant war.

Der Beginn einer Entmischung bzw. dessen Anzeichen wurde im Anschluss bei der Erstellung der Ausgleichskurve bemerkt. Jene Punkte, die mit dem Vergleich der Ausgleichskurve als „Ausreißer“ aufgefallen sind, wurden nochmals genauer betrachtet. Dabei stellte sich meist heraus, dass die zeitliche geschätzte Standardabweichung der Schallgeschwindigkeit der aufgenommenen Messpunkte bereits größer als bei anderen Messpunkten üblich war. Die maximale zugelassene geschätzte Standardabweichung um einen Messpunkt zu verwerfen, liegt für den Druck bei 0,02 bar, für die Temperatur bei 0,02 K und für die Schallgeschwindigkeit bei 0,15 m/s.

Aus diesem Grund wurden Punkte die dies nicht erfüllten für die Ausgleichskurve entfernt und selbige neu berechnet. In Tabelle 4-7 zeigt sich, dass bereits der Punkt mit der Bezeichnung R1234_3%_4 über die Messdauer von zwei Minuten eine geschätzte Standardabweichung der einzelnen gemessenen Schallgeschwindigkeiten von 0,09 m/s hat. Da dieser Punkt noch nicht als Ausreißer beim Ausgleichspolynom identifiziert wurde, blieb dieser als Messpunkt für die Ausgleichskurve erhalten. Der Punkt R1234yf_3%_5 zeigt eine geschätzte Standardabweichung der Schallgeschwindigkeit von 10,2 m/s. Da dieser Punkt relativ nahe an der Verdampfungslinie liegt, muss es sich nicht zwangsweise um eine Entmischung handeln, sondern lediglich um einen Punkt der rechnerisch nur gering Unterkühlt ist. Messpunkte mit einer zu kleinen Unterkühlung konnten mit dem Messtand nicht vermessen werden.

Aufgrund der großen geschätzten Standardabweichung wurde der Punkt R1234yf_3%_5 nicht für die Erzeugung der Ausgleichskurve verwendet. Die verwendeten Punkte für die Erstellung der Ausgleichskurve ist im Kapitel 10.2 ersichtlich.

Ab einer Temperatur von 50 °C, zeigt sich bei allen Messpunkten mit einem OCR Gehalt >3 %, eine große Fluktuation der Schallgeschwindigkeit. Durch die visuelle

4. Messauswertung

Kontrolle während der Messung hat sich die Entmischung im Schauglas gezeigt, und an der großen Standardabweichung der aufgenommenen Messpunkte.

Die Messpunkte R1234_3%_5 bis R1234_3%_17 aus Tabelle 4-7 wurden daher nicht mehr für die Erstellung der Ausgleichskurve verwendet.

Tabelle 4-7 Identifizierung der Entmischung bei 3%o OCR

Bezeichnung	Druck in bar	a in m/s	T in °C	StAbW Druck in bar	StAbW a in m/s	StAbW T in °C
R1234_3%_1	8,35	441,33	29,81	0,02	0,04	0,00
R1234_3%_2	29,44	423,52	40,15	0,00	0,03	0,01
R1234_3%_3	19,10	407,56	40,18	0,01	0,02	0,01
R1234_3%_4	12,03	397,29	40,23	0,01	0,09	0,01
R1234_3%_5	10,68	394,71	40,28	0,16	1,02	0,09
R1234_3%_6	27,74	371,82	50,00	0,02	7,69	0,01
R1234_3%_7	22,81	350,13	50,00	0,00	0,22	0,01
R1234_3%_8	19,72	345,17	50,02	0,01	2,21	0,01
R1234_3%_9	15,40	336,56	50,05	0,01	4,05	0,01
R1234_3%_10	13,98	327,51	50,55	0,12	16,17	0,44
R1234_3%_11	28,38	315,64	60,05	0,00	11,94	0,01
R1234_3%_12	23,55	311,06	60,11	0,01	3,24	0,01
R1234_3%_13	18,83	250,32	60,15	0,02	19,42	0,01
R1234_3%_14	17,91	232,65	61,62	0,23	22,34	0,51
R1234_3%_15	28,06	264,27	70,23	0,01	2,37	0,01
R1234_3%_16	23,78	205,26	70,30	0,03	1,67	0,02
R1234_3%_17	21,64	226,11	70,36	0,02	11,53	0,01

Entmischung von R1234yf und Öl 1

Je nachdem, welches Öl verwendet wird, lässt es sich besser oder schlechter mit dem verwendeten Kältemittel vermischen. Die genauen Grenzen der Entmischung lassen sich erst mit Hilfe des Ausgleichspolynoms mit den Koeffizienten aus dem Kapitel 4.5.2 finden.

Bei den vermessenen Punkten stellte sich heraus, wo die Entmischung begann. Diese sind in der Tabelle 4-8 dargestellt.

Durch die Erkenntnis aus den Messungen mit Entmischung lässt sich sagen, dass die Wahrscheinlichkeit der Entmischung mit steigender Temperatur und steigendem OCR Gehalt sowie mit fallendem Druck steigt.

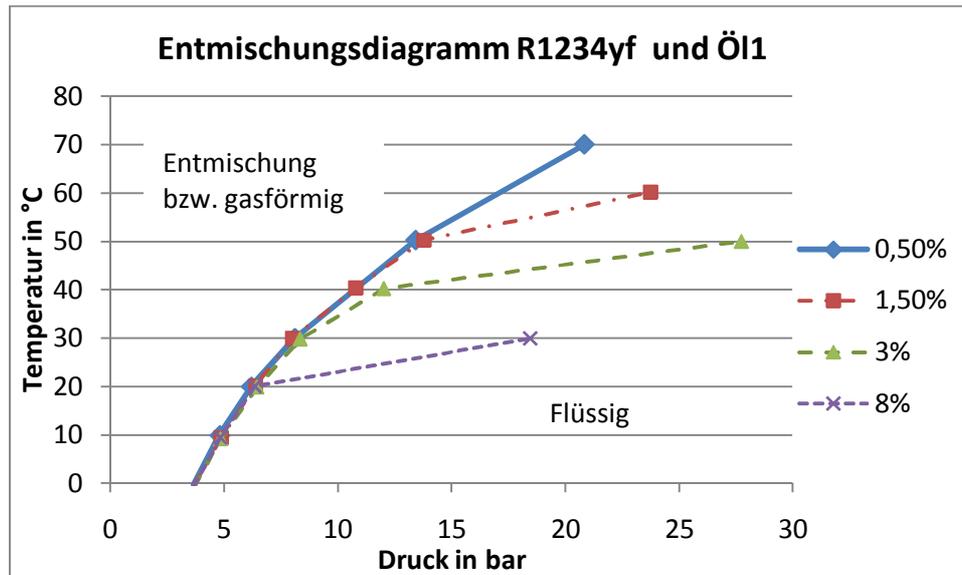


Abbildung 4-18 Entmischungsdiagramm R1234yf/Öl 1

In Abbildung 4-18 sind die Linien mit unterschiedlichen Ölkonzentrationen eingetragen. Dabei gibt der Bereich rechts bzw. unter den Linien an, dass in diesem Bereich das Kältemittel flüssig vorliegt und keine Entmischung festgestellt wurde. Bei einem Druck von 15 bar kommt es bei 8% OCR bereits bei einer Temperatur von unter 30°C zu einer Entmischung, bei 3% OCR erst bei über 40°C. Bei einem OCR von 0,5% konnte keine Entmischung festgestellt werden. Bei einer Temperatur von über 60°C beginnt das R1234yf zu verdampfen. Durch das Verdampfen kommt es auch zwangsläufig zur Entmischung.

Tabelle 4-8 Entmischung R1234yf/ Öl 1

Entmischung OCR in %	Temp °C	Druck bar
1,5	60	24
3	50	28
8	30	20

4.7 Berechnung der Messunsicherheiten

Da alle Messungen mit Fehlern behaftet sind, soll nun deren Auswirkung näher betrachtet werden. Da die Vermessung des Kältemittels R1234yf zuverlässiger war, als die von R134a, wird die Messung von Öl1/R1234yf-Gemisch zum Berechnen der Unsicherheit verwendet.

4.7.1 Allgemein

Die Messunsicherheiten setzen sich aus einem systematischen und einem zufälligen Messfehler zusammen. Bei einem systematischen Messfehler handelt es sich um eine Abweichung vom wahren Wert, der stets in die gleiche Richtung zeigt. Diese Art

der Fehler können, wenn sie bekannt sind, durch Kalibrierung der Messgeräte beseitigt werden. Bei der nachfolgenden Diskussion der Messunsicherheit wird angenommen, dass der systematische Messfehler klein ist und vernachlässigt werden kann.

Zufällige Messfehler entstehen dadurch, dass bei mehreren Messungen trotz völlig identer Zustände nie das gleiche Messergebnis zustande kommt.

Mit mehr Messungen kann der zufällige Fehler durch das arithmetische Mittel verkleinert werden. Bei unendlich vielen Messungen erhält man mit dem arithmetischen Mittel den wahren Wert (vorausgesetzt der systematische Fehler ist null).

Werden die Messpunkte von einem zu vermessenen Punkt in einem Diagramm, in dem die Häufigkeit über den gemessenen Wert dargestellt ist, aufgetragen, erhält man die Normalverteilung. Desto genauer ein Messgerät misst, desto mehr häufen sich die Messwerte in der Nähe um den wahren Wert. Die Standardabweichung bei einer Normalverteilung gibt dabei an, wie nahe sich die einzelnen Messpunkte um den wahren Wert häufen.

Bei Normalverteilung befinden sich rund 68% der Messwerte innerhalb der einfachen Standardabweichung vom Mittelwert entfernt. Innerhalb der zweifachen Standardabweichung befinden sich bereits ca. 95 % aller Messwerte und innerhalb der dreifachen Standardabweichung befinden sich ca. 99,7 % der Messwerte.

Abbildung 4-19 zeigt zwei Normalverteilungen, wobei bei der Verteilung mit der kleineren Standardabweichung mehr Messpunkte genauer vorausgesagt werden können als bei einer Verteilung mit einer größeren Standardabweichung.

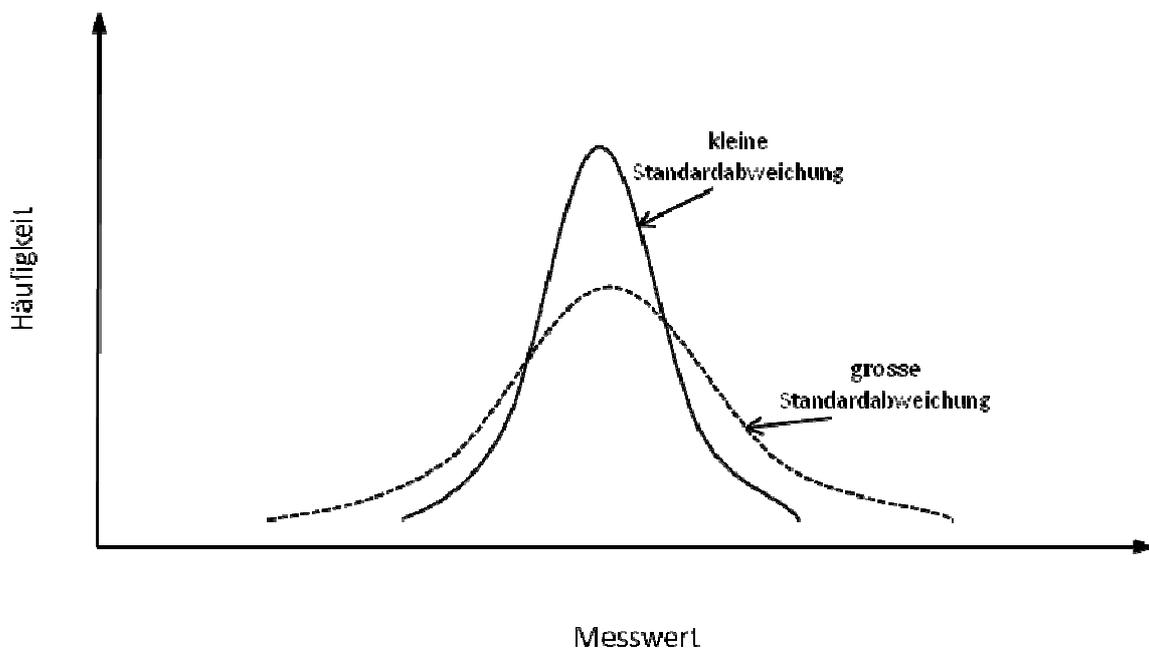


Abbildung 4-19 kleine vs. große Standardabweichung

Bei endlich vielen Messungen wird von der geschätzten Normalverteilung gesprochen.

Für die Angabe der Messunsicherheit wird üblicherweise die einfache Standardabweichung verwendet.

4.7.2 Berechnung

Bei der R1234yf Messung liegt das arithmetische Mittel der Abweichung vom tatsächlichen OCR-Gehalt zum errechneten OCR-Gehalt, durch das Ausgleichspolynom, nahezu bei null (-0,0019 %-Punkten). Die aus den Messwerten berechnete geschätzte Standardabweichung beträgt 0,072 % Punkten. Die Abbildung 4-20 zeigt die Häufigkeiten der Messpunkte über den Abweichungen des errechneten OCR-Gehalts durch das Polynom gegenüber den tatsächlichen OCR Gehalt. Es zeigt, dass die meisten Häufigkeiten innerhalb der einfachen geschätzten Standardabweichung liegen.

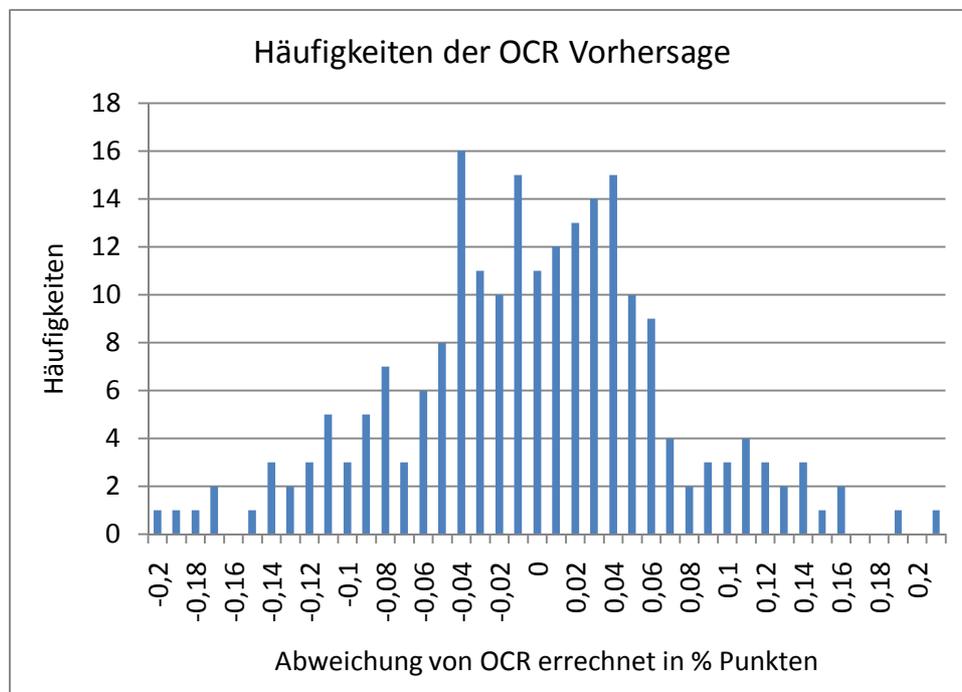


Abbildung 4-20 Häufigkeiten über der Abweichung des errechneten OCR-Gehalts

In Tabelle 4-9 sind die größten Abweichungen vom Ausgleichspolynom zum OCR-Gehalt im Messstand, bei unterschiedlichen OCR-Werten dargestellt. Innerhalb der dreifachen Standardabweichung des Ausgleichspolynoms zum OCR-Gehalt sind alle Messungen enthalten. Es wird angenommen, dass sich die Unsicherheit der OCR-Bestimmung wie eine Normalverteilung verhält.

Tabelle 4-9 größte Abweichung des Polynoms zum tatsächlichen OCR Gehalt

	OCR in %				
	0	0,5	1,5	3	8
Δ OCR min	-0,18	-0,17	-0,12	-0,14	-0,20
Δ OCR max	0,16	0,16	0,19	0,21	0,14

4. Messauswertung

Die Unsicherheit der OCR Berechnung spaltet sich auf drei wesentliche Bereiche auf:

1. Unsicherheit durch den wahren OCR-Gehalt im Messstand
2. Unsicherheit durch die Messung von p , a_{gemisch} , T
3. Unsicherheit durch das Ausgleichspolynom

Dabei nehmen die ersten zwei Punkte Einfluss auf die Koeffizienten des Ausgleichspolynoms.

zu 1.: Die Ölmenge kann auf 0,05 ml bestimmt werden. Im Messstand befinden sich rund 280 g Kältemittel. Mit der Dichte von Öl von rund 1000 kg/m^3 kann der OCR auf $\pm 0,0002\%$ Punkte bestimmt werden. Diese geringe Unsicherheit wird daher nicht weiter berücksichtigt. Daher wird angenommen, dass es keine Unsicherheit beim OCR Gehalt gibt. Es wird im Folgenden dieser Wert als tatsächlicher OCR-Gehalt bezeichnet.

Somit setzt sich die gesamte Unsicherheit von 0,072 % Punkten aus den Unsicherheiten von Punkt 2 und Punkt 3 zusammen.

Die gesamte Unsicherheit nach Gauß ist in (Gl. 4-5) dargestellt.

$u_{s\text{-OCR}}(a_{\text{gemisch}}, p, T, \text{OCR}) =$

$$\sqrt{\left(\frac{\partial \text{OCR}_{\text{wahr}}}{\partial \text{OCR}}\right)^2 u_{s\text{-fit}}^2 + \left(\frac{\partial \text{OCR}_{\text{wahr}}}{\partial p}\right)^2 u_{s\text{-p}}^2 + \left(\frac{\partial \text{OCR}_{\text{wahr}}}{\partial a_{\text{gemisch}}}\right)^2 u_{s\text{-agemisch}}^2 + \left(\frac{\partial \text{OCR}_{\text{wahr}}}{\partial T}\right)^2 u_{s\text{-T}}^2} \quad (\text{Gl. 4-5})$$

Dabei beschreibt $u_{s\text{-OCR}}(a_{\text{gemisch}}, p, T, \text{OCR})$ die gesamte Unsicherheit bei der Bestimmung des OCR-Gehalts.

Der Term $\partial \text{OCR}_{\text{wahr}} / \partial \text{OCR}$ beschreibt die partielle Ableitung des tatsächlichen OCR-Gehalts nach dem errechneten OCR-Wert. Da das Ausgleichspolynom im Mittel mit steigendem tatsächlichen OCR-Gehalts der errechnete OCR-Wert im gleichen Maße steigt, wird dieser Term gleich eins gesetzt ($\partial \text{OCR}_{\text{wahr}} / \partial \text{OCR} = 1$). Da im Mittel auch die Werte ident sind, kann aus diesem Grund, die Funktion des tatsächlichen OCR_{wahr} mit dem Ausgleichspolynom OCR, gleichgesetzt werden.

Somit sind die Terme $\partial \text{OCR}_{\text{wahr}} / \partial p$, $\partial \text{OCR}_{\text{wahr}} / \partial a_{\text{gemisch}}$ und $\partial \text{OCR}_{\text{wahr}} / \partial T$, die partiellen Ableitungen des Ausgleichspolynoms.

Diese partiellen Ableitungen nach a_{gemisch} , p und T wurden numerisch berechnet. Der Wert für die Diskretisierung wurde mit 0,001 der jeweiligen Einheit festgelegt. Diese Diskretisierung hat zur Folge, dass nicht die Tangenten der Funktion sondern deren Sekanten verwendet werden. Der Unterschied ist in Abbildung 4-21 abgebildet. Mit kleiner werdender Diskretisierung wird dabei der numerische Fehler geringer.

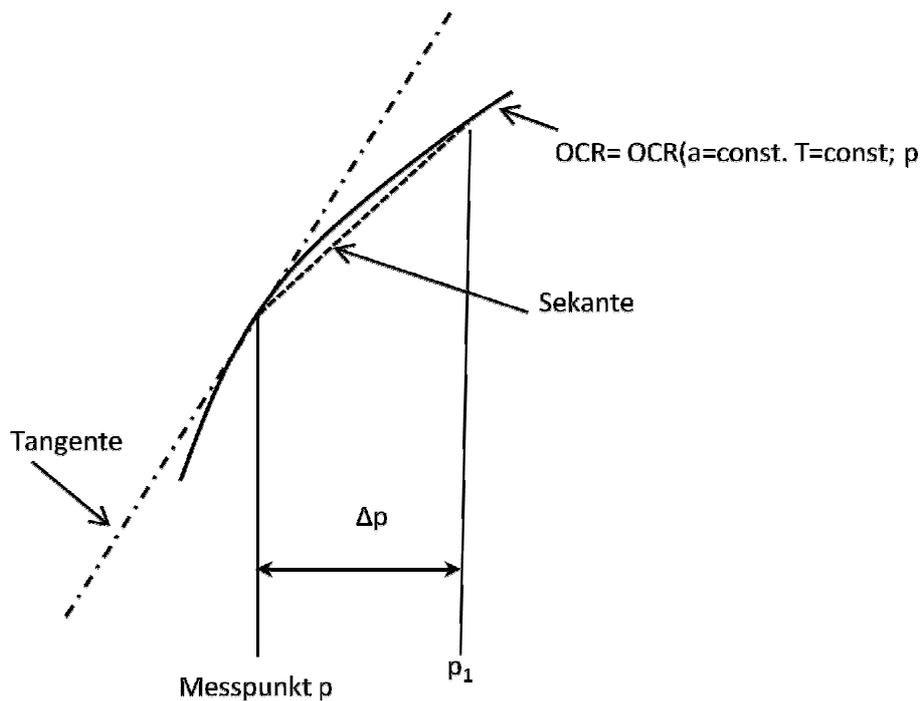


Abbildung 4-21 Tangente vs. Sekante

Die Terme u_{s-p} , $u_{s-agemisch}$, u_{s-T} werden mit den auf den Messgeräten angegebenen Messunsicherheiten festgelegt (vgl. 3.2).

Damit sind alle Terme bis auf u_{s-fit} in der (Gl. 4-5) bestimmt, welcher für jeden einzelnen Messpunkt ausgerechnet werden kann.

Die Berechnung für einen Messpunkt wird nun durchgeführt. Es wird dafür der Messpunkt aus Tabelle 4-10 herangezogen. Diese Tabelle ist ein Auszug aus der Tabelle 10-2.

Tabelle 4-10 Messpunkt von R1234yf

Bezeichnung	Druck in bar	a in m/s	T in °C	OCR _{Wahr} in %	OCR Polynom in %
R1234yf_1	7,84	567,98	-1,41	0,00	0,00

Die Funktion des Ausgleichspolynoms siehe (GL. 4-3)

$\partial OCR / \partial p$, kann näherungsweise als $\Delta OCR / \Delta p$ ersetzt werden. Analog dazu folgen die Ausdrücke $\partial OCR / \partial a$ und $\partial OCR / \partial T$.

In dieser Berechnung wurde wie bereits erwähnt das Δp mit 0,001 bar gewählt.

Somit folgt für $\partial OCR / \partial p$ (Gl. 4-6).

p = Druck vom Messpunkt

$p_1 = p + \Delta p$

4. Messauswertung

$$\Delta OCR = \frac{a_{gemischt} - \sqrt{a \cdot p_1 + b \cdot T^3 + c \cdot T^2 + d \cdot T + e \cdot T \cdot p_1 + f \cdot p_1 \cdot T^2 + g}}{h \cdot T + i \cdot p_1 + k} - \frac{a_{gemischt} - \sqrt{a \cdot p + b \cdot T^3 + c \cdot T^2 + d \cdot T + e \cdot T \cdot p + f \cdot p \cdot T^2 + g}}{h \cdot T + i \cdot p + k} \quad (\text{Gl. 4-6})$$

$$\Delta OCR = 0,000171 \%$$

Somit beträgt dieser Term:

$$\Delta OCR / \Delta p = 0,171 \%/bar$$

Analog dazu folgt

$$\Delta OCR / \Delta T = 0,83 \%/K$$

$$\Delta OCR / \Delta a = 0,184 \%/s/m$$

Wird die (Gl. 4-5) auf u_{s-fit} umgeformt folgt (Gl. 4-7).

$$\sqrt{u_{s-OCR(a_{gemischt}, p, T, OCR)}^2 - \left(\frac{\partial OCR_{wahr}}{\partial p}\right)^2 \cdot u_{s-p}^2 - \left(\frac{\partial OCR_{wahr}}{\partial a_{gemischt}}\right)^2 \cdot u_{s-a_{gemischt}}^2 - \left(\frac{\partial OCR_{wahr}}{\partial T}\right)^2 \cdot u_{s-T}^2} = u_{s-fit} \quad (\text{Gl. 4-7})$$

Die Unsicherheit des Polynoms für den Messpunkt R1234yf_1 lautet:

$$u_{s-fit} = 0,0689 \%-Punkte$$

Wird dieser Vorgang für alle Messpunkte wiederholt ergibt sich daraus ein arithmetischer Mittelwert von 0,06 %-Punkten.

Mit den hier angenommenen Randbedingungen zeigt sich somit, dass die größte Unsicherheit durch das Ausgleichspolynom entsteht und nicht durch die Unsicherheit der Einzelmessungen von p, a und T erhöhbar ist.

4.8 OCR Bestimmung in einem realen Kältekreis

Durch die Bestimmung der Ausgleichskurve unter Punkt 4.5.2 für R1234yf und einem anonymisierten Öl könnte durch Druck, Temperatur und Schallgeschwindigkeit die Ölkonzentration bestimmt werden. Es werden dazu die erhaltenen Koeffizienten aus Kapitel 4.5.2 in die Gleichung (GL. 4-3) eingesetzt.

Da für das R1234yf/ Öl 1 keine Messdaten vorliegen, kann das Ausgleichspolynom derzeit nicht mit realen Messwerten verglichen werden.

Für die Vermessung von R134a und Öl A gibt es Messdaten. Trotz der Schwierigkeit mit der Reproduzierbarkeit bei den Messungen von R134a und Öl A wurde die erhaltene Funktion für Messdaten vom Kompressorprüfstand des VIFs angewendet.

Am Kompressorprüfstand wurden mit R134a und Öl A unter anderem folgende Drücke, Temperaturen und Schallgeschwindigkeiten (siehe Tabelle 4-11) gemessen.

Tabelle 4-11 Messwerte vom Kompressorprüfstand

Bezeichnung	a in m/s	T in °C	p in bar	derzeitige Bestimmung OCR in %	OCR Polynom (GL. 4-3) in %	Δa in m/s zur Refprop
KP_1	584,59	10,13	5,41	2,43	1,21	8,29
KP_2	525,36	23,05	8,67	1,64	1,12	7,17
KP_3	439,60	41,82	14,96	1,19	1,16	5,47
KP_4	378,66	54,49	21,05	0,27	0,47	-0,12

Mit der Ausgleichsfunktion aus 4.5.1 wird die Tabelle 4-11 um die Spalte „OCR Polynom (GL. 4-3) in %“ erweitert. Es zeigt sich, dass der Ölgehalt zwischen 1,21 und 0,47 % schwankt. Wenn allerdings die Spalte ganz rechts betrachtet wird, zeigt sich, dass die Abweichung zur Refprop 9.0 (2010) bezogen auf reines Kältemittel R134a zwischen -0,12 und 8,29 m/s variiert.

Der Vergleich zwischen dem Polynom zur Berechnung des OCR Gehalts, welches derzeit verwendet wurde und dem unter 4.5.1 erstellten zeigt lediglich den gleichen Verlauf. Der Unterschied zwischen den zwei Berechnungen ist allerdings erheblich.

5 Einfluss des Öles auf die Verdampferleistung

Das im Kältemittel enthaltene Öl wirkt sich auf verschiedene Weisen auf den Kreisprozess aus.

1. Reduktion der Verdampferleistung durch Zunahme der Siedetemperatur mit steigender lokalen Ölkonzentration (vgl. Kapitel 2.5)
2. Reduktion der Verdampferleistung durch Abkühlung des Öles nach der Drossel (vgl. Burger et al. (2002))
3. Veränderung des Wärmeüberganges (vgl. Burger et al. (2002))
4. Erhöhter Druckverlust im Verdampfer und Kondensator (vgl. Burger et al. (2002))
5. Verringerung der Verdichteraustrittstemperatur.

Die Berücksichtigung des ersten Punktes wird von Thome, et al., (1995) behandelt. Die Punkte 2,3,4 und 5 sind von Burger et al. (2002) bei einem Kältemittelkreislauf mit R134a und zwei PAG-Ölen untersucht worden.

zu 1: siehe Kapitel 5.2

zu 2: siehe Kapitel 5.1

zu 3: In Burger et al. (2002) wird darauf hingewiesen, dass der Wärmeübergang bis zu einer bestimmten Ölkonzentration verbessert wird. Allerdings werden keine Zahlenwerte oder ähnliches genannt. Da dieser Punkt nur in einer Literatur gefunden wurde, lässt sich vermuten das dieser Einfluss minimal ist.

zu 4: Die viel höhere Dichte des Öles im Vergleich zum gasförmigen Kältemittel reduziert den Volumenförderstrom im Verdichter kaum, weil bei gleichbleibender Schrägstellung der Scheibe (vgl. 1.4) immer das gleiche Volumen vom Verdichter angesaugt wird.

In der flüssigen Phase nimmt das Öl prozentuell einen viel höheren Volumenanteil ein. Dadurch steigt die Strömungsgeschwindigkeit, welche einen quadratischen Einfluss auf den Druckverlust im Verdampfer und Kondensator besitzt. Der beschriebene Einfluss wird in Abbildung 5-1 dargestellt.

5. Einfluss des Öles auf die Verdampferleistung

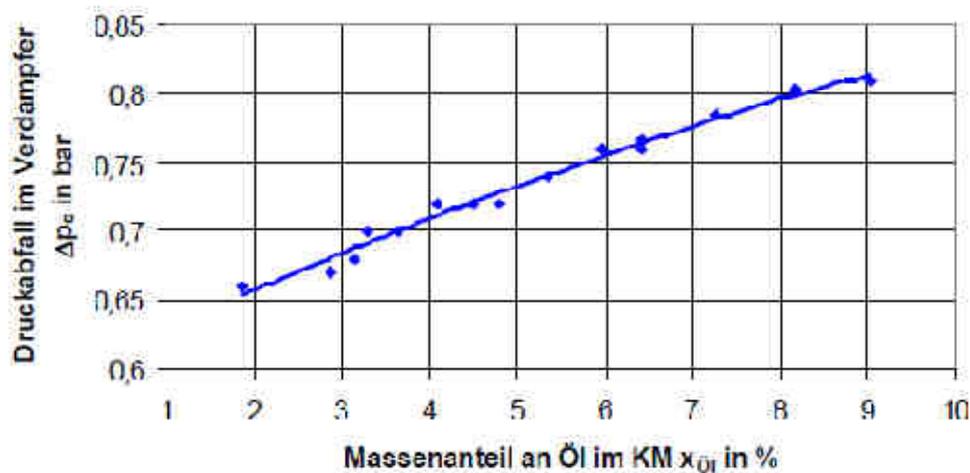


Abbildung 5-1 Druckverlust im Verdampfer aufgrund OCR

Quelle: Burger et al. (2002)

zu 5: Aus dem gleichen Grund, warum sich Öl beim Drosselvorgang kaum abkühlt (sondern durch das Kältemittel abgekühlt wird), steigt auch die Temperatur des Öles kaum, wenn es komprimiert wird. Dadurch wird das Kältemittel während des Verdichtens durch das Öl gekühlt. Dies führt zu einer geringeren Verdichterleistung. Die Abbildung 5-2 gibt den Einfluss des Öles auf die Verdichteraustrittstemperatur an.

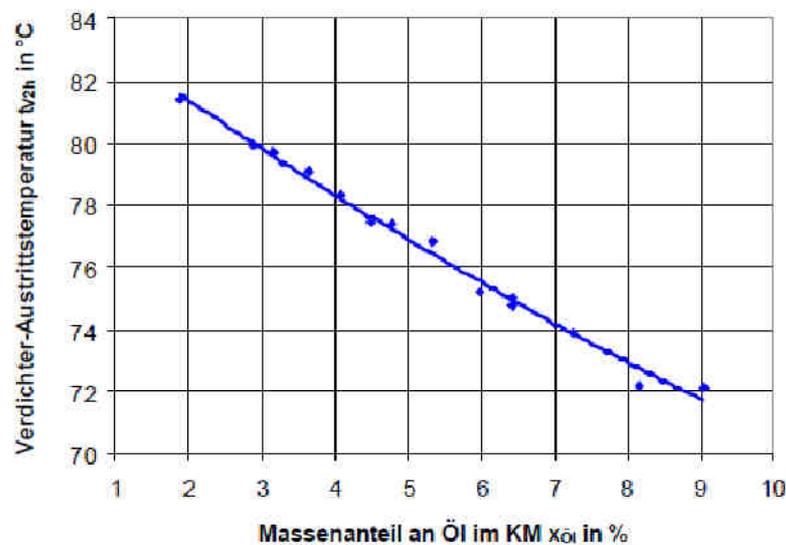


Abbildung 5-2 Reduzierung der Verdichteraustrittstemperatur

Quelle: Burger et al. (2002)

Für die Minderleistung des Verdampfers sind drei unterschiedliche Berechnungsmethoden bekannt.

- Berechnung nach Burger
- Berechnung nach Thome
- Die Korrektur des Kältemittelmassenstromes.

Jede dieser Methoden wird anhand eines Beispiels erläutert. Dabei wurden folgende Randbedingungen verwendet:

5. Einfluss des Öles auf die Verdampferleistung

Kältemittel R134a		
Kondensationstemperatur	$t_{ko} =$	50 °C
Verdampfertemperatur	$T_{VD} =$	0 °C
Verdampferaustrittstemperatur	$T_{ÜH} =$	5 °C
Ölkonzentration	OCR =	3 %
Spezifische Wärmekapazität von Öl	$c_{p,öl} =$	2 kJ/(kg·K)
Gesamtmassenstrom	$m_{gesamt} =$	0,3 kg/s

Eine Unterkühlung vor der Drossel wurde nicht angenommen, da dies in keiner Berechnungsmethode etwas ändert.

Es wird eine Überhitzung von 5 K angenommen. Diese Überhitzung bezieht sich auf den Verdampfungsdruck des reinen Kältemittels. Da sich Öl im Kreislauf befindet, ändert sich die Verdampfungstemperatur mit steigender lokaler Ölkonzentration. Im Kapitel 5.2 wird sich noch zeigen, dass nie das gesamte Kältemittel, vollständig verdampft zum Verdichter gelangen kann.

$$\dot{Q}_{\text{Verdampfer}} = (h_{\text{vor_der_Drossel}} - h_{\text{vor_Verdichtereintritt}}) \cdot m_{\text{gesamt}} = (403 - 272) \cdot 0,3 = 39,4 \text{ kW}$$

Die errechnete Verdampferleistung beträgt 39,4 kW. Die Enthalpiedifferenz Δh stammt dabei aus der Refprop 9.0 (2010), welche mit den Zuständen vor der Drossel und nach dem Verdampferaustritt errechnet wurde. Für diese Berechnung sei auf Baehr (2002) verwiesen.

5.1 Berechnungsmethode nach Burger

Für das nächste Gedankenexperiment werden Öl und Kältemittel bei der Drosselung getrennt.

Wenn das Kältemittel die Drossel passiert, verliert es an Druck. Dies hat zur Folge, dass sich die Temperatur abkühlt. Das Kältemittel liegt nun teils flüssig und teils gasförmig vor. Je nachdem, wie viel Druck in der Drossel abgebaut wurde, ist das Verhältnis von flüssigem und gasförmigem Anteil anders.

Im Gegensatz zum Kältemittel verliert das Öl bei den Randbedingungen dieses Rechenbeispiels in der Drossel nur an Druck aber kaum an Temperatur. Somit lege das Öl nach der Drossel mit 50 °C vor. Da sich allerdings das Öl und das Kältemittel ständig vermischen, kühlt das Kältemittel das Öl. Im Verdampfer haben beide Komponenten eine Temperatur von 0 °C. Diese Kühlung vom Öl erfolgt dadurch, dass eine gewisse Kältemittelmenge vom flüssigen in den gasförmigen Zustand wechselt.

Diese Energiemenge steht im Verdampfer nicht mehr zur Verfügung. Die fehlende Energiemenge stellt die Minderleistung durch das Öl im Verdampfer dar.

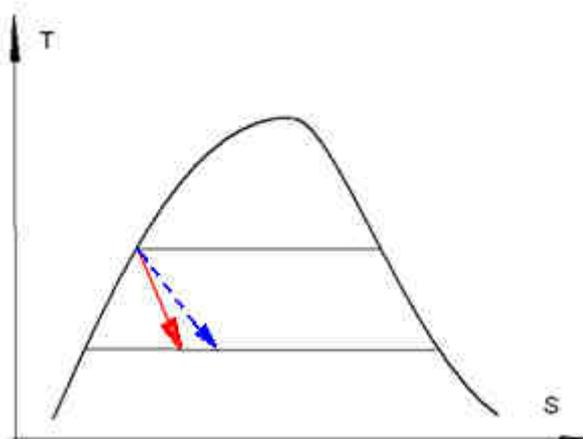


Abbildung 5-3 Berechnung nach Burger

Abbildung 5-3 stellt den Einfluss grafisch dar. Das Kältemittel wird durch das Öl nicht isenthalp entspannt (durchgezogener Pfeil), sondern das Öl verursacht eine Abweichung nach rechts (gestrichelter Pfeil). Das Gemisch kommt nach der Drossel weiter rechts im Diagramm zu liegen. Das bedeutet, dass sich ein größerer Anteil des Kältemittels bereits im gasförmigen Zustand befindet.

Aus (GL. 5-1) wird errechnet, um wieviel die Kühlleistung im Verdampfer abnimmt. Es ist jene Minderleistung, welche benötigt wird, um das Öl von der Temperatur vor der Drossel auf die Siedetemperatur des Kältemittels nach der Drossel abzukühlen.

$$\dot{Q}_{\text{Öl}} = \dot{m}_{\text{Öl}} \cdot (c_{p,\text{Öl},\text{TXV}} \cdot T_{\text{TXV}} - c_{p,\text{Öl},\text{VD}} \cdot T_{\text{VD}}) \quad (\text{GL. 5-1})$$

$\dot{Q}_{\text{Öl}}...$	Wärmebedarf, um das Öl abzukühlen bzw. Minderleistung
$\dot{m}_{\text{Öl}}...$	Ölmassenstrom
$c_{p,\text{Öl},\text{TXV}}...$	spezifische Wärmekapazität des Öls beim Drossel Eintritt
$T_{\text{TXV}}...$	Drosseleintrittstemperatur
$c_{p,\text{Öl},\text{VD}}...$	spezifische Wärmekapazität des Öles beim Verdampferaustritt
$T_{\text{VD}}...$	Verdampferaustrittstemperatur

$$\dot{Q}_{\text{Öl}} = 0,3 \cdot 0,03 \cdot (2 \cdot 50 - 2 \cdot 0) = 0,9 \text{ kW}$$

Das entspricht einer Minderleistung von 2,3 %

5.2 Berechnungsmethode nach Thome

Bei dieser Korrektur der Verdampferminderleistung wird berücksichtigt, dass mit steigender Dampfphase die lokale Ölkonzentration steigt. Dies führt wiederum zu einer höheren Verdampfungstemperatur (vgl. Kapitel 2.5). Dieser Anstieg der Verdampfungstemperatur ist in Abbildung 5-4 schematisch dargestellt.

Während des Verdampfens nimmt die lokale Ölkonzentration zu, da das Öl nicht in den gasförmigen Zustand wechselt. Durch die größer werdende lokale

5. Einfluss des Öles auf die Verdampferleistung

Ölkonzentration steigt auch die Siedetemperatur des Öl/Kältemittel-Gemisches. Das Gemisch kann lediglich die Temperatur der Wärmequelle erreichen. Aus diesem Grund muss auch stets flüssiges Kältemittel zum Verdampfer gelangen. Somit kann im eigentlichen Sinne nie von einer Überhitzung gesprochen werden, da nach wie vor ein kleiner Teil des Kältemittels flüssig vorliegt.

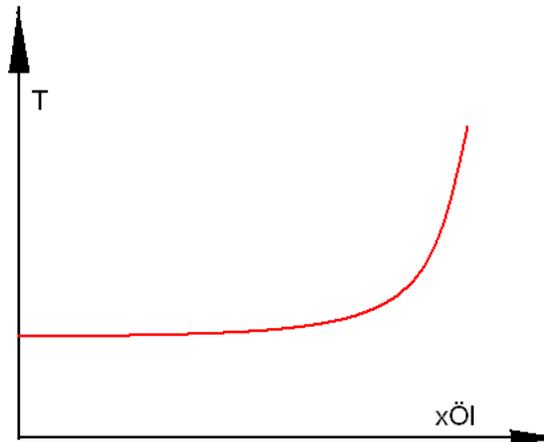


Abbildung 5-4 Verdampfungstemperatur aufgrund der lokalen Ölkonzentration

Die im Verdampfer aufgenommene Wärme wird, wie in den (GL. 5-2) bis (GL. 5-4) angeführt, berechnet.

$$\dot{Q}_{\text{Verdampfer}} = \int_0^l \dot{m} \cdot dh_M \quad (\text{GL. 5-2})$$

$$dh_M = h \cdot dx + c_{p,M} \cdot (1 - x) \cdot dT_{s,M} + c_{p,g} \cdot x \cdot dT_{s,M} \quad (\text{GL. 5-3})$$

$$x = \frac{\dot{m}''_{\text{Kältemittel}}}{\dot{m}_{\text{gesamt}}} = \frac{\dot{m}''_{\text{Kältemittel}}}{\dot{m}_{\text{Kältemittel}} + \dot{m}_{\text{Öl}}} = \frac{\dot{m}''_{\text{Kältemittel}}}{\dot{m}_{\text{Kältemittel}} \cdot (1 + OCR)} \quad (\text{GL. 5-4})$$

$\dot{Q}_{\text{Verdampfer}}$	Kälteleistung des Verdampfers
\dot{m}	Massenstrom des gesamten Öl/Kältemittel-Gemisches
$dh_{m\dots}$	Enthalpiedifferenz des Öl/Kältemittel-Gemisches
h_{\dots}	Verdampfungsenthalpie des reinen Kältemittels
$c_{p,M\dots}$	spezifische Wärmekapazität des flüssigen Öl/Kältemittel-Gemisches
$c_{p,g\dots}$	spezifische Wärmekapazität des reinen Kältemitteldampfes
x_{\dots}	Dampfgehalt
$T_{s,M\dots}$	lokale Siedetemperatur infolge des Ölgehalts
$\dot{m}''_{\text{Kältemittel}}$	Massenstrom des verdampften Kältemittels
\dot{m}_{gesamt}	gesamter Massenstrom
$\dot{m}_{\text{Öl}}$	Massenstrom des Öls

Der Dampfgehalt x bezieht sich hierbei auf den Wert des Quotienten des bereits verdampften Kältemittelmassenstroms zum gesamten Massenstrom

Erläuterung der Terme auf der rechten Seite von (GL. 5-3).

Erster Term ($h \cdot dx$): Entspricht der Energie, die in dem gerade vorherrschenden Zustand notwendig ist, damit das reine Kältemittel verdampft.

Zweiter Term ($c_{p,M} \cdot (1-x) \cdot dT_{S,M}$): Da das Öl nicht in den gasförmigen Zustand übergeht, steigt die lokale Ölkonzentration an dieser Stelle und somit auch die Verdampfungstemperatur. Dieser Term entspricht der Energie, um die flüssige Phase (Kältemittel/Öl) auf die neue Siedetemperatur zu erhöhen. Erst bei dieser Temperatur kann der nächste Kältemitteltropfen verdampfen.

Dritter Term ($c_{p,g} \cdot x \cdot dT_{S,M}$): Entspricht der Energie, um das gasförmige Kältemittel von der alten Siedetemperatur auf die neue Siedetemperatur zu erhöhen.

Wird (GL. 5-3) über die gesamte Länge des Verdampfers angewandt und mit dem Massenstrom multipliziert, erhält man die Wärmeleistung, die von außen dem Verdampfer zugeführt wird. Wird dieser Wert von der Verdampferleistung, die sich aufgrund des Massenstromes mit reinem Kältemittel ergibt, abgezogen, folgt daraus die Minderleistung des Verdampfers.

Am Einfachsten lässt sich das Integral lösen, indem der Verdampfer auf einzelne Punkte aufgeteilt wird. Bei folgender Berechnung wurde der Verdampfer auf elf Punkte aufgeteilt. Im ersten Punkt herrschen die Zustandsgrößen, die sich durch eine isenthalpe Drossel einstellen ohne den Effekt, der unter 5.1 beschrieben wurde).

Die Dampfziffer, die maximal erreicht werden kann (1-OCR) abzüglich der Dampfziffer nach der Drossel, wurde gleichmäßig auf die 11 Punkte verteilt, wobei der Austritt des Verdampfers bei Punkt 10 bereits erreicht ist, unter der Annahme, dass 5 K überhitzt wird.

5. Einfluss des Öles auf die Verdampferleistung

Tabelle 5-1 Berechnung nach Thome

Bezeichnung	x	OCR _{lokal} in %	T _{s,M} in °C	h in kJ/(kg·K)	ΔT _{s,M} in K	Δx	Δh _M in kJ/(kg·K)
Punkt 1	0,36	4,7	0,1	198,5			
Punkt 2	0,43	5,2	0,1	198,5	0,009	0,07	13,5
Punkt 3	0,50	6,0	0,1	198,5	0,011	0,07	13,5
Punkt 4	0,56	6,9	0,1	198,5	0,015	0,07	13,5
Punkt 5	0,63	8,1	0,1	198,5	0,021	0,07	13,5
Punkt 6	0,70	10,0	0,2	198,5	0,031	0,07	13,5
Punkt 7	0,77	12,9	0,2	198,4	0,052	0,07	13,5
Punkt 8	0,83	18,1	0,3	198,3	0,106	0,07	13,6
Punkt 9	0,90	30,7	0,7	198,1	0,349	0,07	13,9
Punkt 10	0,95	64,9	5,0	194,7	4,318	0,05	15,8
Punkt 11	0,97	100,0	39,6	163,5			

In Tabelle 5-1 sind bereits die Werte für die Berechnung eingetragen.

Spalte „Bezeichnung“ gibt an, welcher Punkt im Verdampfer für die Berechnung verwendet wird.

Spalte „x“ gibt an, wie viel vom Kältemittel bereits gasförmig vorliegt.

Spalte „OCR_{lokal}“ gibt die lokale Ölkonzentration an

Spalte „T_{s,M}“ gibt die aus der lokalen Ölkonzentration resultierende Verdampfungstemperatur an.

Spalte „h“ gibt die zugehörige Verdampfungsenergie an

Spalte „ΔT_{s,M}“ gibt die Temperaturerhöhung vom vorhergehenden Punkt im Verdampfer an

Spalte „Δx“ gibt die Differenz der Dampffziffer zum vorhergehenden Punkt im Verdampfer an

Spalte „Δh_M“ gibt das Ergebnis aus (GL. 5-3) zum vorhergehenden Punkt im Verdampfer an

$$\sum_{i=1}^{10} \Delta h_{M i} = 124 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad (\text{GL. 5-5})$$

Das Ergebnis aus (GL. 5-5) ist die Kälteleistung, die nach der Berechnung von Thome im Verdampfer geleistet wird.

Daraus folgt eine Minderleistung von 2,19 kW bzw. 5,6 %.

Es sei erwähnt, dass die Näherungsfunktion wie unter 2.5 beschrieben, lt. Thome, et al (1995) nur für eine Ölkonzentration von etwa 50 % Anwendung finden kann. Bei höheren Konzentrationen können die Koeffizienten von dem vermessenen Öl nicht mehr für andere Öle verwendet werden. Die Stoffeigenschaften des Öles bewirken einen zu großen Einfluss auf die tatsächliche Verdampfungstemperatur. Für eine korrekte Berechnung müsste dieses Öl eigens vermessen werden.

Beim Austritt aus dem Verdampfer beträgt die lokale Ölkonzentration bereits 62,5 %, wofür die Berechnung der Verdampfungstemperatur eigentlich schon ihre Gültigkeit verloren hat.

5.3 Korrektur des Kältemittelmassenstroms

Bei dieser Methode wird angenommen, dass sich der Einfluss des Öles lediglich darauf beschränkt, dass der Massenstrom des Öles sich nicht am Kälteprozess beteiligt. Es wird lediglich der Ölanteil vom gesamten Massenstrom abgezogen. (vgl. (GL. 5-6) Dieser wird als neuer Massenstrom für die Berechnung des Kreislaufes herangezogen.

$$\dot{Q}_{korr} = (\dot{m}_{ges} - \dot{m}_{öl}) \cdot \Delta h \quad (\text{GL. 5-6})$$

\dot{Q}_{korr} ... Verdampferleistung

\dot{m}_{ges} ... gesamter Massenstrom, der sich im Kreislauf bewegt

$\dot{m}_{öl}$... Massenstrom des Öles

Δh ... Enthalpiedifferenz des ein- und austretenden Kältemittel im Verdampfer aufgrund der Zustände

Für oben genannte Randbedingungen gilt:

$$\dot{m}_{ges} = 0,3 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{öl} = 30 \text{ g/s}$$

$$\Delta h = (h_{\text{vor_der_Drossel}} - h_{\text{vor_Verdichtereintritt}}) = (403 - 272) = 131 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$\dot{Q}_{korr} = (1 - 0,03) \cdot 0,3 \cdot 131 = 38,2 \text{ kW}$$

Daraus folgt eine Minderleistung von 1,2 kW bzw. 3 %.

5.4 Gegenüberstellung der Berechnungsmethoden

Diese drei Berechnungsmethoden ergaben folgende Minderleistungen unter den gegebenen Rahmenbedingungen:

$$\dot{Q}_{\text{Burger}} = 0,9 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{\text{Thome}} = 2,19 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{\text{korrektur des Kältemittelmassenstroms}} = 1,2 \text{ kW}$$

Des Weiteren wurden diese drei Methoden für weitere Ölkonzentrationen durchgerechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5-5 für R134a und Abbildung 5-6 für R1234yf dargestellt.

5. Einfluss des Öles auf die Verdampferleistung

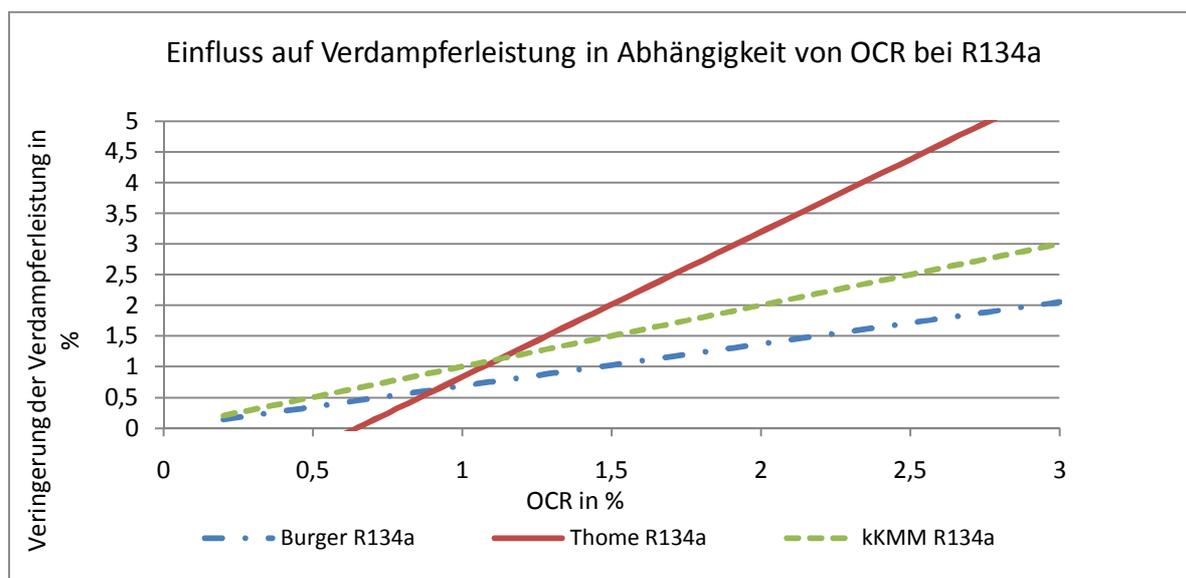


Abbildung 5-5 Verminderung der Verdampferleistung bei R134a

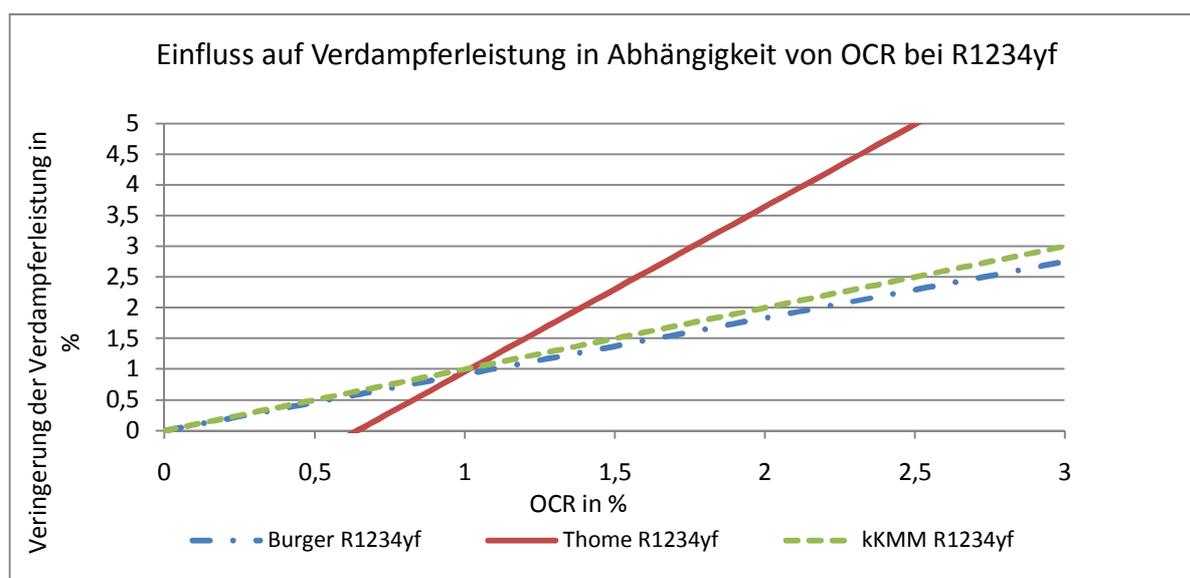


Abbildung 5-6 Verminderung der Verdampferleistung bei R1234yf

Der Verlauf von Thome hat bei geringen OCR's einen negativen Wert. Dies ist entweder auf das nicht ausreichend numerisch aufgelöste Berechnungsverfahren zurückzuführen. Oder es lässt sich auf die Ausgleichskurve der Verdampfungslinie zurückführen.

Bei hoher lokaler Ölkonzentration verliert die Ausgleichsfunktion für die Verdampfungstemperatur ihre Gültigkeit. Mit steigendem OCR wird die lokale Ölkonzentration am Ende des Verdampfers geringer, und die Ausgleichskurve besitzt länger Gültigkeit.

Es zeigen alle drei Berechnungsmethoden allerdings eine lineare Zunahme der Minderleistung über dem Ölgehalt.

5.5 Vergleich mit Messungen

In dem Bericht Jugert et al.(2009) sind diese drei Methoden mit eigenen Messungen verglichen worden. Bei dieser Messung wurden die besten Resultate mit der Korrektur durch Thome erzielt. Die Korrektur des Kältemittelmassenstroms zeigte auch eine gute Annäherung. Lediglich bei der Korrektur durch Burger gab es nach wie vor große Abweichungen zur tatsächlichen Energiebilanz. Die Ergebnisse aus dem Bericht fallen unter die Geheimhaltung der Fa. virtual vehicle. Daher können diese Ergebnisse nicht dieser Arbeit qualitativ beigelegt werden.

Die Messergebnisse aus einem derzeit sich in Betrieb befindlichen Komponentenprüfstand, an dem eine Energiebilanz des Verdampfers aufgestellt wurde, brachte keine besseren Erkenntnisse über den Zusammenhang. In Tabelle 5-2 sind Messdaten von zwei unterschiedlichen Messungen. Dabei ist in den Spalten von links nach rechts

Messpunkt Bezeichnung
 Massenstrom des Gemischs
 Druck vor der Drossel,
 Temperatur vor der Drossel,
 Druck nach der Drossel,
 errechnete Siedetemperatur durch den Drosseldruck für reines R134a mittels Refprop 9.0, (2010),
 Enthalpie vor der Drossel errechnet mittels Refprop 9.0, (2010)

Unterer Teil der Tabelle von links nach rechts
 Messpunkt Bezeichnung
 Temperatur Verdichtereintritt
 Druck bei Verdichtereintritt (nach den eingebauten Filtern)
 Enthalpie errechnet nach Verdampfer mit Druck im Verdampfer und Verdichtereintrittstemperatur
 Leistung im Verdampfer auf der Kältemittelseite mit $\dot{Q}=(h_1-h_4) \cdot \dot{m}_{\text{Gemisch}}$

Tabelle 5-2 Zustände des Kältemittels R134a

Bezeichnung	R134a	Zustand vor Drossel		Verdampfer		Drosseleintritt
	\dot{m}_{Gemisch} in kg/h	p_4 in bar	T_4 in °C	p_{eintritt} in bar	T_s in °C	h_4 in kJ/kg
MP_1	128,96	14,97	41,92	3,76	7,14	259,19
MP_2	110,71	20,96	54,84	3,51	5,13	278,88
	Verdichtereintritt			Leistung R134a		
	T_{eintritt} in °C	p_{eintritt} in bar	h_1 in kJ/kg	Q_{R134a} in kW		
MP_1	23,82	3,00	419,64	5,75		
MP_2	25,91	2,99	421,54	4,39		

In Tabelle 5-3 sind die Zustände der Wärmequelle des Verdampfers.
 Spalten von links nach rechts

5. Einfluss des Öles auf die Verdampferleistung

Messpunkte Bezeichnung
Massenstrom der Sole
Eintrittstemperatur der Sole
Austrittstemperatur der Sole
Spezifische Wärmekapazität der Sole
Wärmeleistung der Wärmequelle

Tabelle 5-3 Messdaten Sole

Verdampfer Sole Seite					
Bezeichnung	m_{sole} in kg/h	T_{Eintritt} in °C	T_{Austritt}	c_p in k/kgK	Q_{Sole} in kW
MP_1	1695,5	23,6	27,4	3,2	5,68
MP_2	1705,2	25,6	28,8	3,2	4,93

An dieser Messung hat es wenig Sinn, eine Berechnung der Minderleistung im Verdampfer anzuwenden. Es zeigt sich für den MP1, dass die errechnete Verdampferleistung auf der Kältemittelseite um 1,2 % höher ist beim MP2 allerdings um 11 % kleiner. Das würde bedeuten, dass beim MP2 mehr Energie über die Sole zugeführt wurde, als das Kältemittel aufnehmen hätte können.

Eine Ursache könnte die Unsicherheit der spezifischen Wärmekapazität der Sole sein, da das Mischungsverhältnis nicht genau bekannt ist.

Somit kann man keine nähere Betrachtung durch die Anwendung der unterschiedlichen Berechnungsmethoden der Minderleistungen im Verdampfer durchgeführt werden.

5.6 Fazit

Allgemein bleibt zu sagen, dass für eine Berechnung der Minderleistung Versuche an Prüfständen durchgeführt werden müssen. Nur so können sich vertrauenswürdige Aussagen treffen lassen. und Zusammenhänge erkannt werden.

Bei der Messung von Jugert et al. (2009) wurde eine geringere Verdampferleistung gemessen, als bei einer gewöhnlichen Berechnung der Verdampferleistung zustande käme.

Korrektur des Kältemittelmassenstromes:

Die Korrektur des Kältemittelmassenstromes führte in dem Bericht Jugert et al. (2009) bereits zu einer guten Annäherung. Die Berechnung mit dem korrigierten Massenstrom ist vermutlich etwas zu kurz gegriffen. Die Überlegung, dass sich das Öl nicht direkt am Kälteprozess beteiligt, mag wohl auf den ersten Blick richtig sein, jedoch übt das Öl einen erheblichen Einfluss auf das Kältemittel aus.

Burger:

Die alleinige Minderleistung durch Burger konnte die geringere Leistung im Verdampfer im Bericht Jugert et al. (2009) nicht erklären.

Thome:

Im Bericht Jugert et al.(2009) wurde die Schlussfolgerung gezogen, dass die Berechnung nach Thome die alleinige Minderleistung klärt. In diesen

5. Einfluss des Öles auf die Verdampferleistung

Untersuchungen wurde die Leistungsbilanz im Verdampfer mit Kältemittel und Luft aufgestellt.

Die errechnete Minderleistung durch Thome ergab somit die beste Annäherung. Allerdings kam es dabei bereits teilweise zu einer zu größeren vorausgesagten Minderleistung als tatsächlich gemessen wurde.

Beide Berechnungsmethoden (Thome und Burger) berücksichtigen jedoch nicht den Druckverlust im Verdampfer. Dies führt dazu, dass die Verdampfungstemperatur sinkt, und somit die Verdampferleistung sich etwas erhöht. Ein erhöhter Druckverlust macht sich wie bereits berichtet durch einen höheren Ölgehalt bemerkbar.

Die Literaturrecherche regte folgende Mutmaßungen an, warum die Verdampferleistung im Bericht Jugert et al.(2009) um die Minderleistung von Burger + Thome betragen hätte können.

Erste Mutmaßung:

Die Berechnung der ansteigenden Verdampfungstemperatur durch den Öleinfluss kann mit den richtigen Koeffizienten (vgl. (GL. 2-6) und (GL. 2-7)) nur bis 70 % vorausgesagt werden. Mit den Koeffizienten von einem anderen Öl hat die Formel nur einen Gültigkeitsbereich bis 50 % OCR.

Diese Öl-Konzentration wird im Verdampfer allerdings überschritten. Somit müsste mit der Berechnung nach Thome für eine erste Verbesserung der Berechnung die Koeffizienten für das verwendete Öl/Kältemittel-Gemisch ermittelt werden. Für eine zweite Verbesserung müsste eine neue Funktion ermittelt werden, die den Bereich zwischen 70 % bis zur Konzentration des Verdampferaustritts abdeckt.

Zweite Mutmaßung:

Im hinteren Teil des Verdampfers sollte die numerischen Lösung feiner diskretisiert werden, da sich erst mit höherem OCR Gehalt die Siedetemperatur merklich erhöht. Das Verfeinern wurde in dem Bericht Jugert et al.(2009) nicht durchgeführt.

Alles würde dafür sprechen, dass die Berechnung nach Burger und nach Thome zusammengezählt werden können. Beide berücksichtigen den Einfluss des Öles in unterschiedlichen Bereichen des Kreisprozesses.

Aus der Abbildung 5-5 lässt sich schließen, dass durch die Addition von Thome und Burger bei 3 % OCR bei den durchgerechneten Beispiel mit einer Minderleistung von 7,9 % zu rechnen ist. Wie bereits erwähnt ist die Minderleistung durch Thome bei einem geringen OCR sicher nicht negativ. Die Gründe für die negative Minderleistung bei kleinen OCR Werten wurde bereits diskutiert.

Es lässt sich an dieser Stelle nicht feststellen, ob die Minderleistung von Thome + Burger wegen dem Verlassen des Gültigkeitsbereich die falsche Verdampfungstemperatur berechnet wird, oder ob Außerhalb des Gültigkeitsbereich der Funktion die tatsächliche Minderleistung errechnet wird. Zweiteres hätte zur Folge, dass die Leistung in dem Bericht von Jugert et al. (2009) falsch gemessen worden ist.

5. Einfluss des Öles auf die Verdampferleistung

Die in diesem Kapitel durchgeführte Berechnung der Minderleistung ergibt durch den scheinbar linearen Zusammenhang eine Minderleistung von $(7,9/3=2,6)$ 2,6 % pro 1 % OCR.

Das Öl nimmt in jedem Teilbereich des Kreisprozesses einen Einfluss. Um bessere Erkenntnisse über die Auswirkung zu bekommen, sollten daher alle Bereiche gleichzeitig und nicht einzeln untersucht werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde der Zusammenhang von Öl/Kältemittel-Gemischen recherchiert und dieser mit einem Messstand überprüft.

Das Kältemittel R134a ist in neu typisierten Autos in der EU bereits verboten. Viele Hersteller haben sich für das neue Kältemittel R1234yf entschieden. Ob und wie gefährlich es im Straßenverkehr tatsächlich ist, wird sich nach den ersten Unfällen vermutlich zeigen.

Dass das bis dato verwendete Polynom für die Bestimmung des OCR Wertes negative Werte ausgab, war beinahe das einzige, was beim Antreten dieser Arbeit bekannt war. Die negativen OCR-Werte wurden bei einem realen Komponentenprüfstand gemessen.

Der errichtete Prüfstand für die Vermessung von Öl/Kältemittel-Gemischen wurde für 30 bar ausgelegt. Trotz der intensiven Recherche und sorgfältigen Planung des Messstandes, konnten keine Erläuterungen über Versuchsstände dieser Art gefunden werden, weder über das Prinzip der Druckeinstellung, noch die Einstellung der Ölkonzentration und deren Schwierigkeiten mit der Reproduzierbarkeit. Allerdings lässt sich aus der Abbildung 6-1 (entnommen aus Burger, et al., (2002)) erkennen, dass es scheint, dass die Messpunkte von deren Ausgleichskurve schwer angenähert werden konnte. So befindet sich der Punkt mit 20 K Unterkühlung und ca. 8 % OCR 6,8 m/s von der Ausgleichskurve entfernt. Diese Abweichung beträgt wie unter 4.5 behandelt, einen Fehler von über 1 % OCR.

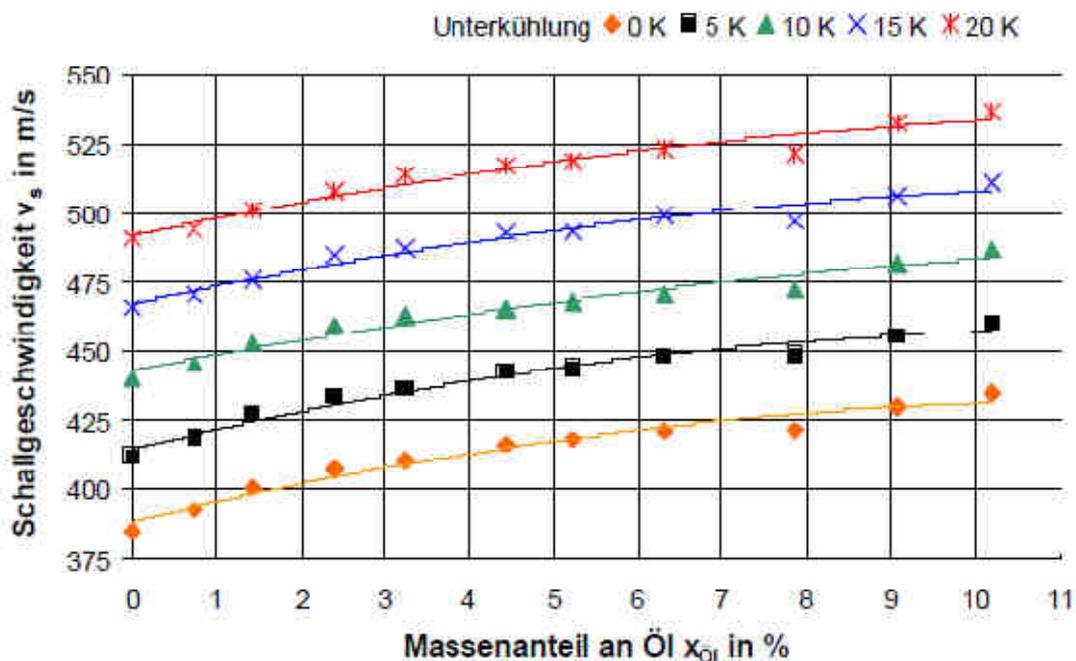


Abbildung 6-1 Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Unterkühlung und OCR
Quelle: Burger, et al., (2002)

Bei der Vermessung der Schallgeschwindigkeit hat sich gezeigt, dass sich mehrere Probleme auftun können, wenn die Schallgeschwindigkeit sehr genau vermessen werden soll. Es ergaben sich Schwierigkeiten bei der Reproduzierung der Schallgeschwindigkeit von reinem Kältemittel, welche allerdings der Ausgangspunkt für die Bestimmung des OCR ist.

Ob die nicht vorhandene Reproduzierbarkeit bei Verschmutzung oder bei falsch funktionierenden Messgeräten liegt, muss derzeit noch unbeantwortet bleiben.

Durch mehrere Vermessungen von reinem R134a wurde festgestellt, dass durch die Befüllung mit einem Service Gerät für Autoklimaanlagen nicht ölfreies Kältemittel in den Messstand gelangt. Durch direkte Befüllung aus der Kältemittelflasche konnte mit einer unmittelbar darauffolgenden Messung die Reproduzierbarkeit deutlich verbessert werden

Was die ganze Sache noch erschwert hat, war die Suche nach einem Polynom, welches die Messpunkte relativ genau wiedergibt. Bei dem gefunden Polynom entsteht derzeit die größte Unsicherheit bei der Bestimmung des OCR Gehalts.

Das Öl hat auf den gesamten Kreisprozess einen Einfluss. Unter anderem verringert es die Kühlleistung im Verdampfer. Berechnungsansätze zur Bereinigung der Verdampferleistung sind zwar bereits in der Literatur vorhanden, diese sind aus thermodynamischer Sicht nachvollziehbar, aber aus Mangel an zuverlässigen Messdaten von Komponentenprüfständen bleibt ein Zusammenführen der einzelnen Berechnungsmethode ungelöst.

Ausblick:

Die zeitliche Abnahme der Schallgeschwindigkeit konnte noch nicht geklärt werden. Die Theorie mit dem durch diffundierenden Stickstoff durch die Membran konnte derzeit noch nicht genauer kontrolliert werden. Die Besprechung mit dem Hersteller des Schallgeschwindigkeitsensors hat ergeben, dass sich hin und wieder Beläge im Schallsensor bilden, diese können die Schallgeschwindigkeitsmessung beeinträchtigen. Bei der nächsten Entleerung werden die Bauteile auf etwaige Korrosion oder andere Beläge überprüft.

Der zweite Thermometer soll mit einem anderen Datenlogger gemessen werden. Falls dies eine Verbesserung bringt, kann die Temperatur an einer zweiten Messung kontrolliert werden und somit die Temperaturempfindlichkeit des OCR ein zweites Mal überprüft werden.

Die Funktion des Drucksensors wird mit einem anderen Druckmessgeräts überprüft.

Vollständige Vermessung von R134a und Öl A.

7 Literaturverzeichnis

Ahnefeld, Gerhard, Rudolf Heide, und Torsten Näther. „Kontinuierliche Messung der Ölkonzentration in Kälteanlagen.“ *KI Luft und Kältetechnik*, 12 1996: 545-548.

Baehr, Hans Dieter. *Thermodynamik. Grundlagen und technische Anwendungen*. Berlin: Springer, 2002.

Burger, Rainer, und Peter Klug. *Untersuchung des Öleinflusses auf das Leistungsverhalten des Verdampfers einer Pkw.Klimaanlage*. KI Luft und Kältetechnik, 5/2002.

Halbach, Andreas, und Christian Rohde. „CCI Promotor.“ ZDF. 28. Oktober 2008. <http://www.cci-promotor.de/content/webdoc2096/frontal21.pdf> (Zugriff am 3. August 2010).

Heimel, Kriegler, Reichenpfader, und Zwangsleitner. *Die Schallgeschwindigkeit von Flüssigkeiten als Meßgröße zur Produkterkennung und Konzentrationsbestimmung im Laboratorium und im Prozeß*. Graz: Labor für Meßtechnik Dr. H. Stabinger, 1996.

Honeywell. *Material Safety Data Sheet*. 2008.

Jugert, Rene, Rosenkranz Kristian, und Martin Klaus. *Abschlussbericht Vif_AB-2009_013*. Graz: Kompetenzzentrum das virtuelle Fahrzeug, 2009.

Lequenne, Julien. „Ölmessungen für eine R134a-PKW-Klimaanlage.“ The Virtual Vehicle Competence Center vif, Graz, 2008.

National Institute of Standards and Technology, Boulder, Colorado (USA). „NIST Standard Reference Database 23.“

Navarro de Andrade, Eduardo, Eric Skowron, Victor W Goldschmidt, und Eckhard A Groll. *Oil concentration in liquid refrigerants in situ measurement*. International Journal of Refrigeration 22, 1999.

Rajiv, R, Singh Shankland, und Ian R Shankland. „1234fakten.“ Honeywell. 2010. www.1234fakten.de (Zugriff am 28. Juli 2010).

Richter, M., M.O. McLinden, und E.W. Lemmon. „Thermodynamic Properties of 2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene (R1234yf): p-rho-T Measurements and an Equation of State.“ *J. Chem. Eng.* 2010.

Rieberer, Rene. *Stoffwerte-Datenbank, PROPERTY.LIB PROEXCEL.DLL (PROPEES.FDL), PROPMIX.LIB, DEC 5 Power Station*. 2006.

Rieberer, Rene, Harald Moser, und H Halozan. *Skriptum zur Vorlesung 307.052 Wärmepumpentechnik, Institut für Wärmetechnik, TU Graz*. 2009.

Scheiber, Hannes. „Wärmeübergang und Druckverlust von Kältemittel-Öl-Gemischen.“ 2001.

Stalter, Michael, und Rainer Burger. *Ölzirkulationsmessungen in Kfz-Kältemittel-Kreisläufen*. KI Kälte Luft Klimatechnik, 2007.

Stenhede, Claes, und Akfa Laval Thermal. *Das Handbuch für Plattenwärmübertrager in der Kälte- und Klimatechnik*. Alonte, Italien: Alfa Laval, 1999.

Thome, John R, und D Phil. *Comprehensive Thermodynamic Approach To Modelling Refrigerant-Lubricant Oil Mixtures*. Int.J. HVAC&R Research, Vol 1, 1995.

Tillner-Roth, R., und H. D. Baehr. „An international standard formulation of the thermodynamic properties of 1,1,1,2-tetrafluoroethane (HFC-134a) for temperatures from 170 K to 455 K at pressures up to 70 MPa.“ *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 23:657-729. 1994.

Umetrics. „Modde 9.0.“ <http://www.umetrics.com/modde>, 2009.

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1 Schallgeschwindigkeit von R134a.....	12
Tabelle 2-2 Druckeinfluss auf die Schallgeschwindigkeit von R134a.....	12
Tabelle 2-3 Temperatureinfluss auf die Schallgeschwindigkeit R134a	13
Tabelle 2-4 Schallgeschwindigkeit von R1234yf	13
Tabelle 2-5 Druckeinfluss auf die Schallgeschwindigkeit bei R1234yf.....	13
Tabelle 2-6 Temperatureinfluss auf die Schallgeschwindigkeit bei R1234yf	14
Tabelle 2-7 Koeffizienten für Siedetemperatur von R22 und AB Öl.....	17
Tabelle 2-8 Auszug aus Berechnung der Koeffizienten a_0 und b_0 für R134a	18
Tabelle 2-9 Zunahme der Verdampfungstemperatur bei R134a durch OCR	21
Tabelle 2-10 Zunahme der Verdampfungstemperatur von R1234yf durch OCR	22
Tabelle 3-1 Messmatrix einer Konzentration für R1234yf.....	44
Tabelle 3-2 angestrebte Unterkühlung von R1234yf	45
Tabelle 3-3 Restmenge im Messstand bei Entleerung	45
Tabelle 4-1 maximale zulässige Messfehler um $\Delta OCR = 0,1 \%$ - Punkte für R1234yf bei 5 bar/5°C	47
Tabelle 4-2 maximale zulässige Messfehler um $\Delta OCR = 0,1 \%$ -Punkte für R1234yf bei 25 bar/70°C.....	47
Tabelle 4-3 Abweichungsmöglichkeit von Refprop bei R134a bei 30 bar.....	48
Tabelle 4-4 Reproduzierung von R134a	52
Tabelle 4-5 Angegebene Unsicherheit von Refprop für R1234yf und 30 bar.....	55
Tabelle 4-6 Ergebnis der Referenz Messung von R1234yf.....	57
Tabelle 4-7 Identifizierung der Entmischung bei 3‰ OCR	66
Tabelle 4-8 Entmischung R1234yf/ Öl 1.....	67
Tabelle 4-9 größte Abweichung des Polynoms zum tatsächlichen OCR Gehalt	69
Tabelle 4-10 Messpunkt von R1234yf	71
Tabelle 4-11 Messwerte vom Kompressorprüfstand.....	73
Tabelle 5-1 Berechnung nach Thome.....	80
Tabelle 5-2 Zustände des Kältemittels R134a.....	83
Tabelle 5-3 Messdaten Sole	84
Tabelle 10-1 Messpunkte R134a mit Öl A.....	94
Tabelle 10-2 Messpunkte von R134yf und anonymes Öl 1.....	103

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1 Darstellung eines Kälteprozesses.....	2
Abbildung 1-2 systematischer Aufbau eines Kälteprozess	3
Abbildung 1-3 Prinzip des Verdichters	5
Abbildung 1-4 Dampfdruck von R134a und R1234yf.....	7
Abbildung 2-1 Kältemittel und Öl Mengen in PKW-Klimaanlagen.....	10
Abbildung 2-2 Ölwurf eines PKW-Klimaanlageverdichter	11
Abbildung 2-3 Verlauf der Schallgeschwindigkeiten von R134a und R1234yf.....	14
Abbildung 2-4 Systematischer Verlauf von a in Öl/Kältemittel-Gemisch	16
Abbildung 2-5 Verlauf des Koeffizienten A(R134a;OCR _{lokal} =0 %;p)	19
Abbildung 2-6 Verlauf des Koeffizienten B(R134a;OCR _{lokal} =0 %;p).....	19
Abbildung 2-7 Siedetemperatur von R134a bzw. R1234yf -Ölgemisch.....	21
Abbildung 3-1 Skizze des Messstandes.....	23
Abbildung 3-2 Foto Messstand	24
Abbildung 3-3 Pumpenkennlinie	25
Abbildung 3-4 Ausdehnungsgefäß	27
Abbildung 3-5 Entleerungsbehälter	28
Abbildung 3-6 T-Stückerinlage	30
Abbildung 3-7 Skizze Schallsensor Anton Paar	31
Abbildung 3-8 gleichzeitige Kalibrierung der Temperturmessgeräte	32
Abbildung 3-9 Evakuieren des Befüllungsbehälters	33
Abbildung 3-10 Befüllung des Befüllungsbehälters.....	34
Abbildung 3-11 Erhitzen des Zwischenstückes Ventil 1-3	35
Abbildung 3-12 Ende des Füllvorganges des Befüllungsbehälters.....	36
Abbildung 3-13 Anschluss an Messstand	37
Abbildung 3-14 Füllvorgang des Messstandes	38
Abbildung 3-15 Abschließen des Befüllungsbehälters.....	38
Abbildung 3-16 Systematischer Verlauf der Messpunkte	39
Abbildung 3-17 Oberfläche des verwendeten Datenlogprogramm	41
Abbildung 3-18 MeasureControl.vi	42
Abbildung 4-1 Abnahme der Temperatur durch Druckreduzierung im Messstand ...	48
Abbildung 4-2 Ergebnis der ersten Messung von R134a.....	49
Abbildung 4-3 Ergebnis der zweiten Messung von R134a.....	49
Abbildung 4-4 Ergebnis der dritten Messung von R134a.....	49
Abbildung 4-5 Gegenüberstellung der drei	50
Abbildung 4-6 Gegenüberstellung der drei	50
Abbildung 4-7 Gegenüberstellung der	50
Abbildung 4-8 Gegenüberstellung der	50
Abbildung 4-9 Abnahme der Schallgeschwindigkeit im Verlauf der Zeit	53
Abbildung 4-10 Schallgeschwindigkeitsabweichung von R1234yf zur Refprop	54
Abbildung 4-11 Reproduzierung R1234yf.....	56
Abbildung 4-12 Abhängigkeiten der Schallgeschwindigkeit.....	58
Abbildung 4-13 Auswirkung ungeeigneter Ausgleichsformen	60
Abbildung 4-14 Treffsicherheit der Messpunkte inkl. Druck von R134a/Öl A.....	61
Abbildung 4-15 T und a der Messpunkte von R134a/Öl A	61
Abbildung 4-16 Treffsicherheit der Messpunkte inkl. Druck bei R1234yf/Öl1	63
Abbildung 4-17 Zustandsgrößen von a und T bei R1234yf und Öl 1	64
Abbildung 4-18 Entmischungsdiagramm R1234yf/Öl 1.....	67

Abbildung 4-19 kleine vs. große Standardabweichung	68
Abbildung 4-20 Häufigkeiten über der Abweichung des errechneten OCR-Gehalts .	69
Abbildung 4-21 Tangente vs. Sekante	71
Abbildung 5-1 Druckverlust im Verdampfer aufgrund OCR	75
Abbildung 5-2 Reduzierung der Verdichteraustrittstemperatur	75
Abbildung 5-3 Berechnung nach Burger	77
Abbildung 5-4 Verdampfungstemperatur aufgrund der lokalen Ölkonzentration	78
Abbildung 5-5 Verminderung der Verdampferleistung bei R134a.....	82
Abbildung 5-6 Verminderung der Verdampferleistung bei R1234yf	82
Abbildung 6-1 Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Unterkühlung und OCR..	87

10 Anhang

10.1 Messergebnisse von R134a und Öl A

Tabelle 10-1 Messpunkte R134a mit Öl A

	Druck	a	T Schall	ocr
R134a_001	4,02	625,38	0,01	0,00
R134a_002	4,09	613,07	2,58	0,00
R134a_003	4,09	613,07	2,53	0,00
R134a_004	4,96	577,19	10,38	0,00
R134a_005	4,96	577,19	10,33	0,00
R134a_006	5,90	577,90	10,41	0,00
R134a_007	5,90	577,90	10,36	0,00
R134a_008	5,97	614,55	2,56	0,00
R134a_009	5,97	614,55	2,51	0,00
R134a_010	6,00	529,02	20,63	0,00
R134a_011	6,00	578,69	10,25	0,00
R134a_012	6,19	534,69	19,47	0,00
R134a_013	6,19	534,69	19,41	0,00
R134a_014	7,02	530,04	20,62	0,00
R134a_015	7,93	628,70	-0,03	0,00
R134a_016	7,93	489,03	29,11	0,00
R134a_017	7,96	580,38	10,24	0,00
R134a_018	8,02	536,25	19,48	0,00
R134a_019	8,02	536,25	19,42	0,00
R134a_020	8,03	616,11	2,56	0,00
R134a_021	8,03	616,11	2,51	0,00
R134a_022	8,08	531,15	20,62	0,00
R134a_023	8,09	579,40	10,46	0,00
R134a_024	8,09	579,40	10,41	0,00
R134a_025	8,29	486,83	29,68	0,00
R134a_026	8,29	486,83	29,61	0,00
R134a_027	8,30	486,87	29,68	0,00
R134a_028	8,30	486,87	29,61	0,00
R134a_029	9,72	488,50	29,68	0,00
R134a_030	9,72	488,50	29,61	0,00
R134a_031	9,94	580,94	10,46	0,00
R134a_032	9,94	580,94	10,41	0,00
R134a_033	9,98	538,24	19,47	0,00
R134a_034	9,98	538,24	19,41	0,00
R134a_035	10,16	445,38	38,87	0,00
R134a_036	10,16	445,38	38,79	0,00
R134a_037	10,25	617,81	2,58	0,00
R134a_038	10,25	617,81	2,53	0,00

R134a_039	11,84	540,10	19,46	0,00
R134a_040	11,84	540,10	19,40	0,00
R134a_041	11,96	448,87	37,86	0,00
R134a_042	11,96	448,87	37,78	0,00
R134a_043	11,98	493,51	29,11	0,00
R134a_044	11,98	631,67	0,00	0,00
R134a_045	12,02	442,00	39,59	0,00
R134a_046	12,04	583,84	10,22	0,00
R134a_047	12,12	619,06	2,62	0,00
R134a_048	12,12	619,06	2,57	0,00
R134a_049	12,14	582,75	10,48	0,00
R134a_050	12,14	582,75	10,42	0,00
R134a_051	12,21	491,35	29,67	0,00
R134a_052	12,21	491,35	29,61	0,00
R134a_053	13,95	542,17	19,44	0,00
R134a_054	13,95	542,17	19,38	0,00
R134a_055	14,01	493,32	29,66	0,00
R134a_056	14,01	493,32	29,59	0,00
R134a_057	14,07	389,30	50,24	0,00
R134a_058	14,18	390,19	49,94	0,00
R134a_059	14,18	390,19	49,86	0,00
R134a_060	14,22	451,98	37,83	0,00
R134a_061	14,22	451,98	37,76	0,00
R134a_062	14,26	620,59	2,64	0,00
R134a_063	14,26	620,59	2,59	0,00
R134a_064	14,38	584,48	10,50	0,00
R134a_065	14,38	584,48	10,45	0,00
R134a_066	15,71	495,24	29,66	0,00
R134a_067	15,71	495,24	29,59	0,00
R134a_068	15,90	544,08	19,42	0,00
R134a_069	15,90	544,08	19,36	0,00
R134a_070	15,98	447,30	39,59	0,00
R134a_071	16,01	497,97	29,11	0,00
R134a_072	16,04	587,23	10,20	0,00
R134a_073	16,06	539,01	20,56	0,00
R134a_074	16,06	585,94	10,48	0,00
R134a_075	16,06	585,94	10,43	0,00
R134a_076	16,06	621,77	2,66	0,00
R134a_077	16,06	621,77	2,61	0,00
R134a_078	16,07	392,58	50,23	0,00
R134a_079	16,10	634,46	0,03	0,00
R134a_080	16,21	393,68	49,90	0,00
R134a_081	16,21	393,68	49,82	0,00
R134a_082	16,31	454,82	37,81	0,00
R134a_083	16,31	454,82	37,74	0,00

R134a_084	17,53	339,79	60,18	0,00
R134a_085	17,87	497,68	29,65	0,00
R134a_086	17,87	497,68	29,59	0,00
R134a_087	17,90	546,08	19,40	0,00
R134a_088	17,90	546,08	19,34	0,00
R134a_089	17,94	339,91	60,03	0,00
R134a_090	17,94	339,91	59,95	0,00
R134a_091	18,03	396,79	49,87	0,00
R134a_092	18,03	396,79	49,79	0,00
R134a_093	18,15	623,19	2,70	0,00
R134a_094	18,15	623,19	2,65	0,00
R134a_095	18,27	587,81	10,46	0,00
R134a_096	18,27	587,81	10,41	0,00
R134a_097	18,40	457,56	37,81	0,00
R134a_098	18,40	457,56	37,73	0,00
R134a_099	19,83	547,89	19,38	0,00
R134a_100	19,83	547,89	19,32	0,00
R134a_101	19,87	499,79	29,65	0,00
R134a_102	19,87	499,79	29,58	0,00
R134a_103	19,89	344,88	60,14	0,00
R134a_104	19,93	502,21	29,13	0,00
R134a_105	20,01	399,15	50,20	0,00
R134a_106	20,05	544,09	20,18	0,00
R134a_107	20,05	452,61	39,58	0,00
R134a_108	20,08	637,06	0,08	0,00
R134a_109	20,09	344,80	59,94	0,00
R134a_110	20,09	344,80	59,86	0,00
R134a_111	20,10	590,57	10,19	0,00
R134a_112	20,16	459,78	37,81	0,00
R134a_113	20,16	459,78	37,74	0,00
R134a_114	20,21	624,55	2,73	0,00
R134a_115	20,21	624,55	2,68	0,00
R134a_116	20,21	589,61	10,44	0,00
R134a_117	20,21	589,61	10,39	0,00
R134a_118	20,31	400,61	49,82	0,00
R134a_119	20,31	400,61	49,74	0,00
R134a_120	21,53	501,76	29,61	0,00
R134a_121	21,53	501,76	29,55	0,00
R134a_122	21,91	349,41	59,72	0,00
R134a_123	21,91	349,41	59,64	0,00
R134a_124	22,04	403,52	49,74	0,00
R134a_125	22,04	403,52	49,66	0,00
R134a_126	22,07	590,91	10,47	0,00
R134a_127	22,07	590,91	10,41	0,00
R134a_128	22,11	288,69	70,07	0,00

R134a_129	22,24	625,89	2,76	0,00
R134a_130	22,24	625,89	2,71	0,00
R134a_131	22,26	297,00	68,59	0,00
R134a_132	22,26	297,00	68,50	0,00
R134a_133	22,32	550,34	19,37	0,00
R134a_134	22,32	550,34	19,31	0,00
R134a_135	23,07	463,26	37,87	0,00
R134a_136	23,07	463,26	37,80	0,00
R134a_137	23,74	457,24	39,57	0,00
R134a_138	23,87	504,22	29,62	0,00
R134a_139	23,87	504,22	29,55	0,00
R134a_140	23,91	506,25	29,16	0,00
R134a_141	23,92	352,95	60,12	0,00
R134a_142	23,98	593,68	10,16	0,00
R134a_143	23,99	405,37	50,17	0,00
R134a_144	24,05	639,65	0,13	0,00
R134a_145	24,06	548,69	20,08	0,00
R134a_146	24,08	354,68	59,57	0,00
R134a_147	24,08	354,68	59,49	0,00
R134a_148	24,09	294,04	70,06	0,00
R134a_149	24,15	551,96	19,37	0,00
R134a_150	24,15	551,96	19,31	0,00
R134a_151	24,16	592,56	10,46	0,00
R134a_152	24,16	592,56	10,41	0,00
R134a_153	24,25	303,05	68,46	0,00
R134a_154	24,25	303,05	68,37	0,00
R134a_155	24,27	627,19	2,81	0,00
R134a_156	24,27	627,19	2,76	0,00
R134a_157	24,30	407,90	49,54	0,00
R134a_158	24,30	407,90	49,46	0,00
R134a_159	25,95	553,65	19,34	0,00
R134a_160	25,95	553,65	19,28	0,00
R134a_161	26,10	594,14	10,48	0,00
R134a_162	26,10	594,14	10,42	0,00
R134a_163	26,12	309,91	68,06	0,00
R134a_164	26,12	309,91	67,98	0,00
R134a_165	26,15	359,37	59,47	0,00
R134a_166	26,15	359,37	59,38	0,00
R134a_167	26,16	466,53	37,99	0,00
R134a_168	26,16	466,53	37,92	0,00
R134a_169	26,16	506,64	29,61	0,00
R134a_170	26,16	506,64	29,55	0,00
R134a_171	26,25	628,15	2,92	0,00
R134a_172	26,25	628,15	2,87	0,00
R134a_173	26,31	411,50	49,39	0,00

R134a_174	26,31	411,50	49,31	0,00
R134a_175	26,89	596,21	10,11	0,00
R134a_176	27,43	461,77	39,57	0,00
R134a_177	27,62	467,24	38,21	0,00
R134a_178	27,62	467,24	38,13	0,00
R134a_179	27,74	642,05	0,19	0,00
R134a_180	27,79	465,78	38,29	0,00
R134a_181	27,79	465,78	38,29	0,00
R134a_182	27,79	465,78	38,29	0,00
R134a_183	27,89	414,72	49,25	0,00
R134a_184	27,89	414,72	49,17	0,00
R134a_185	27,98	595,30	10,57	0,00
R134a_186	27,98	595,30	10,51	0,00
R134a_187	28,02	555,56	19,33	0,00
R134a_188	28,02	555,56	19,27	0,00
R134a_189	28,16	314,22	68,47	0,00
R134a_190	28,16	314,22	68,38	0,00
R134a_191	28,18	629,08	3,06	0,00
R134a_192	28,18	629,08	3,01	0,00
R134a_193	28,21	510,50	29,27	0,00
R134a_194	28,24	411,81	50,09	0,00
R134a_195	28,26	552,86	19,99	0,00
R134a_196	28,31	508,83	29,62	0,00
R134a_197	28,31	508,83	29,56	0,00
R134a_198	28,33	306,20	70,05	0,00
R134a_199	28,43	361,38	60,12	0,00
R134a_200	28,55	363,25	59,97	0,00
R134a_201	28,55	363,25	59,89	0,00
R134a_202	3,94	628,37	-0,13	0,50
R134a_203	5,71	579,92	10,31	0,50
R134a_204	5,82	531,70	20,57	0,50
R134a_205	7,48	630,45	-0,02	0,50
R134a_206	7,71	581,59	10,36	0,50
R134a_207	7,71	493,17	28,39	0,50
R134a_208	8,01	533,33	20,62	0,50
R134a_209	10,63	496,24	28,72	0,50
R134a_210	11,52	584,83	10,29	0,50
R134a_211	11,71	444,13	39,60	0,50
R134a_212	11,97	537,12	20,63	0,50
R134a_213	11,99	633,82	0,01	0,50
R134a_214	13,77	390,84	50,36	0,50
R134a_215	14,72	500,75	28,72	0,50
R134a_216	15,53	587,81	10,34	0,50
R134a_217	15,59	449,32	39,60	0,50
R134a_218	15,82	394,32	50,34	0,50

R134a_219	15,98	635,99	0,16	0,50
R134a_220	16,02	540,94	20,67	0,50
R134a_221	17,53	341,02	60,42	0,50
R134a_222	17,64	503,97	28,71	0,50
R134a_223	18,60	591,42	10,14	0,50
R134a_224	19,63	454,55	39,59	0,50
R134a_225	19,67	400,63	50,31	0,50
R134a_226	19,80	345,94	60,36	0,50
R134a_227	19,96	638,19	0,34	0,50
R134a_228	20,02	544,83	20,66	0,50
R134a_229	21,46	508,03	28,70	0,50
R134a_230	21,54	290,05	69,81	0,50
R134a_231	22,54	594,71	10,12	0,50
R134a_232	23,52	406,67	50,27	0,50
R134a_233	23,63	298,86	69,78	0,50
R134a_234	23,69	459,63	39,58	0,50
R134a_235	23,71	353,96	60,30	0,50
R134a_236	23,73	548,29	20,64	0,50
R134a_237	23,96	640,06	0,52	0,50
R134a_238	27,23	551,45	20,62	0,50
R134a_239	27,31	308,18	69,77	0,50
R134a_240	27,48	412,84	50,19	0,50
R134a_241	27,54	464,35	39,58	0,50
R134a_242	27,67	514,38	28,70	0,50
R134a_243	27,69	361,70	60,24	0,50
R134a_244	28,38	599,08	10,16	0,50
R134a_245	28,83	644,04	0,38	0,50
R134a_246	3,56	628,02	0,09	1,00
R134a_247	5,77	536,13	20,00	1,00
R134a_248	6,15	584,33	9,99	1,00
R134a_249	6,90	540,06	19,17	1,00
R134a_250	7,34	632,73	-0,24	1,00
R134a_251	7,77	492,17	29,27	1,00
R134a_252	7,88	585,80	9,95	1,00
R134a_253	7,89	538,26	19,98	1,00
R134a_254	8,48	492,61	28,98	1,00
R134a_255	10,52	448,64	38,12	1,00
R134a_256	10,83	537,97	20,53	1,00
R134a_257	11,35	635,43	-0,21	1,00
R134a_258	11,51	541,86	19,97	1,00
R134a_259	11,86	496,82	29,26	1,00
R134a_260	11,91	589,18	9,95	1,00
R134a_261	13,36	406,77	47,41	1,00
R134a_262	13,49	444,47	40,47	1,00
R134a_263	13,78	541,91	20,26	1,00

R134a_264	13,98	393,95	50,32	1,00
R134a_265	14,05	544,33	19,95	1,00
R134a_266	14,70	637,56	-0,15	1,00
R134a_267	15,42	447,20	40,43	1,00
R134a_268	15,96	592,48	9,94	1,00
R134a_269	15,97	501,50	29,23	1,00
R134a_270	15,98	397,32	50,29	1,00
R134a_271	16,90	547,04	19,94	1,00
R134a_272	17,32	352,39	58,56	1,00
R134a_273	18,02	345,53	60,25	1,00
R134a_274	18,21	639,80	-0,09	1,00
R134a_275	19,43	452,51	40,41	1,00
R134a_276	19,69	595,53	9,93	1,00
R134a_277	19,83	547,41	20,28	1,00
R134a_278	20,01	403,92	50,26	1,00
R134a_279	20,03	506,02	29,19	1,00
R134a_280	20,06	349,91	60,19	1,00
R134a_281	20,38	315,55	65,82	1,00
R134a_282	21,55	642,02	-0,06	1,00
R134a_283	21,86	296,25	69,84	1,00
R134a_284	23,06	457,22	40,37	1,00
R134a_285	23,35	598,49	9,94	1,00
R134a_286	23,77	510,10	29,15	1,00
R134a_287	23,86	301,03	69,96	1,00
R134a_288	23,95	410,13	50,19	1,00
R134a_289	23,97	357,71	60,14	1,00
R134a_290	26,10	555,63	19,90	1,00
R134a_291	26,99	363,67	60,05	1,00
R134a_292	27,35	513,90	29,11	1,00
R134a_293	27,35	415,50	50,13	1,00
R134a_294	27,36	462,58	40,28	1,00
R134a_295	27,58	558,58	19,46	1,00
R134a_296	27,82	646,42	-0,03	1,00
R134a_297	27,97	310,04	70,13	1,00
R134a_298	28,27	602,23	9,94	1,00
R134a_299	7,32	541,38	19,76	1,60
R134a_300	8,85	494,51	29,67	1,60
R134a_301	10,86	450,10	38,84	1,60
R134a_302	11,01	545,61	19,68	1,60
R134a_303	11,08	498,86	28,82	1,60
R134a_304	11,25	451,85	38,15	1,60
R134a_305	13,52	408,77	47,76	1,60
R134a_306	14,02	547,70	19,51	1,60
R134a_307	14,06	501,66	28,83	1,60
R134a_308	14,17	453,55	38,73	1,60

R134a_309	14,45	400,96	48,78	1,60
R134a_310	17,20	358,34	58,19	1,60
R134a_311	19,86	550,75	20,45	1,60
R134a_312	19,98	504,73	29,85	1,60
R134a_313	20,11	458,89	39,33	1,60
R134a_314	20,28	407,53	49,48	1,60
R134a_315	20,49	354,06	59,36	1,60
R134a_316	20,49	318,36	66,05	1,60
R134a_317	20,86	317,20	65,65	1,60
R134a_318	7,96	544,24	21,16	3,55
R134a_319	10,81	465,10	38,43	3,55
R134a_320	11,01	553,24	20,41	3,55
R134a_321	11,01	507,33	29,43	3,55
R134a_322	11,36	462,33	38,48	3,55
R134a_323	13,73	416,92	48,65	3,55
R134a_324	13,86	556,80	20,07	3,55
R134a_325	13,93	511,14	29,29	3,55
R134a_326	14,01	464,78	38,67	3,55
R134a_327	14,27	414,09	48,27	3,55
R134a_328	17,28	368,68	58,60	3,55
R134a_329	19,92	566,08	18,98	3,55
R134a_330	20,02	520,78	28,34	3,55
R134a_331	20,11	422,77	48,33	3,55
R134a_332	20,13	473,92	38,19	3,55
R134a_333	20,29	369,46	58,40	3,55
R134a_334	20,30	332,27	65,78	3,55
R134a_335	20,65	334,54	64,76	3,55
R134a_336	8,59	557,82	21,37	6,00
R134a_337	10,97	570,83	19,36	6,00
R134a_338	11,03	523,23	29,02	6,00
R134a_339	11,07	478,03	38,61	6,00
R134a_340	11,35	476,94	38,31	6,00
R134a_341	13,78	482,01	37,72	6,00
R134a_342	13,93	430,05	48,82	6,00
R134a_343	13,96	574,48	19,12	6,00
R134a_344	14,03	528,89	28,36	6,00
R134a_345	14,19	433,37	47,82	6,00
R134a_346	17,36	382,91	58,53	6,00
R134a_347	20,05	436,20	48,47	6,00
R134a_348	20,09	383,12	58,09	6,00
R134a_349	20,10	578,96	19,41	6,00
R134a_350	20,19	532,93	29,06	6,00
R134a_351	20,27	348,12	65,23	6,00
R134a_352	20,30	487,01	38,58	6,00
R134a_353	20,32	346,30	65,64	6,00

R134a_354	10,82	492,72	37,95	8,00
R134a_355	11,02	557,43	24,57	8,00
R134a_356	11,10	581,22	19,66	8,00
R134a_357	11,39	487,80	38,65	8,00
R134a_358	13,69	445,46	48,01	8,00
R134a_359	13,87	583,67	19,69	8,00
R134a_360	13,94	489,61	38,65	8,00
R134a_361	13,95	537,64	29,19	8,00
R134a_362	14,00	438,72	48,33	8,00
R134a_363	17,17	396,69	57,90	8,00
R134a_364	19,88	590,44	19,42	8,00
R134a_365	19,96	544,52	28,87	8,00
R134a_366	20,07	498,22	38,41	8,00
R134a_367	20,15	359,44	64,97	8,00
R134a_368	20,21	447,32	48,61	8,00
R134a_369	20,38	393,40	58,41	8,00

10.2 Messpunkte von R1234yf und Öl 1

Tabelle 10-2 Messpunkte von R134yf und anonymes Öl 1

Bezeichnung	Druck	a	T Schall	ocr	ocr errechnet
R1234yf_1	7,84	567,98	-1,41	0,00	0,00
R1234yf_2	11,74	571,36	-1,38	0,00	-0,02
R1234yf_3	3,59	563,66	-1,37	0,00	-0,04
R1234yf_4	4,48	564,36	-1,36	0,00	-0,04
R1234yf_5	15,57	574,63	-1,33	0,00	-0,03
R1234yf_6	19,57	577,83	-1,23	0,00	-0,03
R1234yf_7	28,44	584,88	-1,07	0,00	-0,09
R1234yf_8	3,73	560,46	-0,56	0,00	0,03
R1234yf_9	8,01	563,96	-0,40	0,00	0,07
R1234yf_10	10,90	566,68	-0,38	0,00	0,08
R1234yf_11	16,12	571,00	-0,28	0,00	0,07
R1234yf_12	20,08	574,56	-0,27	0,00	0,06
R1234yf_13	24,11	577,73	-0,16	0,00	0,05
R1234yf_14	27,63	580,37	-0,04	0,00	0,05
R1234yf_15	28,33	540,40	9,13	0,00	-0,12
R1234yf_16	23,61	535,74	9,18	0,00	-0,08
R1234yf_17	19,54	531,13	9,36	0,00	-0,02
R1234yf_18	15,58	527,16	9,36	0,00	-0,02
R1234yf_19	7,83	519,15	9,37	0,00	-0,04
R1234yf_20	5,82	517,02	9,37	0,00	-0,05
R1234yf_21	4,82	516,04	9,38	0,00	-0,03
R1234yf_22	27,23	538,29	9,40	0,00	-0,09
R1234yf_23	23,00	534,02	9,47	0,00	-0,05
R1234yf_24	19,58	530,52	9,52	0,00	-0,02
R1234yf_25	14,32	525,21	9,55	0,00	0,01
R1234yf_26	11,80	522,53	9,56	0,00	0,00
R1234yf_27	7,85	518,36	9,58	0,00	-0,01
R1234yf_28	28,47	494,88	19,86	0,00	-0,01
R1234yf_29	23,69	489,52	19,91	0,00	0,03
R1234yf_30	19,66	484,85	19,93	0,00	0,03
R1234yf_31	6,32	469,21	19,94	0,00	0,01
R1234yf_32	15,74	480,21	19,96	0,00	0,02
R1234yf_33	11,74	475,38	19,98	0,00	0,00
R1234yf_34	7,35	469,98	20,00	0,00	-0,03
R1234yf_35	19,30	483,35	20,21	0,00	0,06
R1234yf_36	15,44	478,85	20,21	0,00	0,04
R1234yf_37	23,39	487,97	20,21	0,00	0,05
R1234yf_38	11,68	474,35	20,21	0,00	0,03

R1234yf_39	28,50	493,63	20,21	0,00	0,03
R1234yf_40	7,86	469,66	20,22	0,00	-0,01
R1234yf_41	6,52	468,02	20,22	0,00	-0,02
R1234yf_42	28,38	452,13	29,71	0,00	-0,03
R1234yf_43	23,33	445,53	29,75	0,00	0,00
R1234yf_44	19,38	440,14	29,80	0,00	0,01
R1234yf_45	28,54	452,12	29,84	0,00	0,03
R1234yf_46	15,64	434,93	29,85	0,00	0,01
R1234yf_47	23,30	445,30	29,87	0,00	0,06
R1234yf_48	11,75	429,39	29,88	0,00	-0,01
R1234yf_49	19,56	440,27	29,89	0,00	0,06
R1234yf_50	13,75	432,31	29,90	0,00	0,04
R1234yf_51	8,15	424,06	29,91	0,00	-0,06
R1234yf_52	9,32	425,87	29,93	0,00	-0,01
R1234yf_53	8,45	424,66	29,93	0,00	-0,01
R1234yf_54	28,32	407,06	39,84	0,00	-0,13
R1234yf_55	23,25	399,23	39,91	0,00	-0,05
R1234yf_56	19,41	392,84	39,99	0,00	-0,03
R1234yf_57	15,43	386,15	40,06	0,00	-0,01
R1234yf_58	10,63	377,67	40,11	0,00	-0,07
R1234yf_59	28,44	406,33	40,21	0,00	0,01
R1234yf_60	19,44	392,36	40,23	0,00	0,08
R1234yf_61	15,66	386,05	40,27	0,00	0,09
R1234yf_62	12,15	379,80	40,30	0,00	0,04
R1234yf_63	10,73	376,94	40,35	0,00	-0,01
R1234yf_64	28,28	362,61	49,58	0,00	-0,15
R1234yf_65	23,37	353,42	49,61	0,00	-0,08
R1234yf_66	19,29	345,27	49,67	0,00	-0,04
R1234yf_67	15,53	337,42	49,71	0,00	-0,06
R1234yf_68	13,55	332,99	49,75	0,00	-0,08
R1234yf_69	28,40	361,49	50,08	0,00	0,03
R1234yf_70	23,14	351,65	50,10	0,00	0,12
R1234yf_71	19,42	344,23	50,12	0,00	0,14
R1234yf_72	14,84	334,59	50,14	0,00	0,10
R1234yf_73	13,66	331,13	50,24	0,00	0,02
R1234yf_74	28,07	313,13	59,69	0,00	-0,18
R1234yf_75	22,87	300,52	59,78	0,00	-0,04
R1234yf_76	16,99	283,61	60,06	0,00	-0,03
R1234yf_77	28,39	312,30	60,26	0,00	0,06
R1234yf_78	23,00	299,24	60,28	0,00	0,16
R1234yf_79	18,13	285,61	60,30	0,00	0,03
R1234yf_80	17,46	278,70	61,03	0,00	-0,11
R1234yf_81	20,84	234,23	69,85	0,00	-0,07
R1234yf_82	21,40	233,41	70,31	0,00	-0,02
R1234yf_83	28,07	256,33	70,48	0,00	0,11

R1234yf_84	21,27	231,39	70,58	0,00	0,02
R1234yf_85	27,78	254,31	70,58	0,00	0,02
R1234yf_86	3,68	561,68	-0,35	0,50	0,44
R1234yf_87	4,45	561,19	-0,05	0,50	0,46
R1234yf_88	7,82	563,49	0,16	0,50	0,48
R1234yf_89	11,73	566,97	0,25	0,50	0,52
R1234yf_90	15,57	570,00	0,37	0,50	0,51
R1234yf_91	28,14	580,30	0,49	0,50	0,38
R1234yf_92	19,48	572,88	0,50	0,50	0,49
R1234yf_93	28,95	541,33	9,60	0,50	0,33
R1234yf_94	23,19	535,82	9,64	0,50	0,40
R1234yf_95	20,80	532,89	9,76	0,50	0,39
R1234yf_96	15,56	527,53	9,81	0,50	0,42
R1234yf_97	7,79	519,16	9,87	0,50	0,39
R1234yf_98	4,81	515,96	9,90	0,50	0,39
R1234yf_99	5,84	516,75	9,94	0,50	0,37
R1234yf_100	23,16	491,44	19,93	0,50	0,52
R1234yf_101	19,51	487,24	19,94	0,50	0,52
R1234yf_102	15,47	482,49	19,97	0,50	0,51
R1234yf_103	11,70	478,03	19,97	0,50	0,49
R1234yf_104	7,34	472,69	19,99	0,50	0,46
R1234yf_105	6,19	471,26	19,99	0,50	0,45
R1234yf_106	29,10	497,03	20,08	0,50	0,44
R1234yf_107	29,11	455,47	29,82	0,50	0,51
R1234yf_108	23,05	447,54	29,88	0,50	0,56
R1234yf_109	19,42	442,62	29,92	0,50	0,56
R1234yf_110	13,48	434,45	29,95	0,50	0,55
R1234yf_111	9,29	428,42	29,97	0,50	0,50
R1234yf_112	8,11	426,64	29,98	0,50	0,48
R1234yf_113	29,10	409,52	40,30	0,50	0,49
R1234yf_114	19,13	393,99	40,35	0,50	0,59
R1234yf_115	15,56	388,03	40,39	0,50	0,59
R1234yf_116	12,14	382,10	40,41	0,50	0,56
R1234yf_117	10,65	379,40	40,42	0,50	0,54
R1234yf_118	29,27	365,36	50,13	0,50	0,49
R1234yf_119	14,81	336,91	50,22	0,50	0,61
R1234yf_120	13,41	333,69	50,26	0,50	0,60
R1234yf_121	28,54	314,38	60,35	0,50	0,46
R1234yf_122	17,26	284,85	60,58	0,50	0,62
R1234yf_123	23,73	302,14	60,59	0,50	0,66
R1234yf_124	20,83	236,14	70,06	0,50	0,55
R1234yf_125	27,43	256,19	70,54	0,50	0,55
R1234yf_126	21,78	235,36	70,63	0,50	0,47
R1234yf_127	4,75	568,80	-0,36	1,50	1,54
R1234yf_128	7,92	570,58	-0,02	1,50	1,61

R1234yf_129	11,82	573,76	0,08	1,50	1,62
R1234yf_130	15,65	576,83	0,21	1,50	1,64
R1234yf_131	19,62	579,75	0,43	1,50	1,69
R1234yf_132	28,88	586,52	0,60	1,50	1,52
R1234yf_133	28,69	548,09	9,26	1,50	1,38
R1234yf_134	5,09	524,62	9,35	1,50	1,46
R1234yf_135	4,89	524,38	9,36	1,50	1,46
R1234yf_136	5,13	524,58	9,36	1,50	1,45
R1234yf_137	23,94	543,20	9,37	1,50	1,42
R1234yf_138	15,89	535,42	9,39	1,50	1,47
R1234yf_139	19,48	538,81	9,41	1,50	1,46
R1234yf_140	23,80	496,89	20,10	1,50	1,55
R1234yf_141	19,90	492,50	20,10	1,50	1,55
R1234yf_142	15,90	487,90	20,11	1,50	1,54
R1234yf_143	7,35	477,66	20,11	1,50	1,47
R1234yf_144	28,49	502,01	20,11	1,50	1,54
R1234yf_145	11,93	483,15	20,11	1,50	1,51
R1234yf_146	6,39	476,41	20,12	1,50	1,46
R1234yf_147	29,09	460,87	29,77	1,50	1,49
R1234yf_148	23,82	454,07	29,82	1,50	1,54
R1234yf_149	19,09	447,79	29,86	1,50	1,55
R1234yf_150	13,53	440,03	29,90	1,50	1,52
R1234yf_151	9,23	433,95	29,92	1,50	1,48
R1234yf_152	8,01	432,07	29,94	1,50	1,46
R1234yf_153	28,63	414,46	40,19	1,50	1,47
R1234yf_154	19,72	400,32	40,31	1,50	1,54
R1234yf_155	15,83	393,84	40,35	1,50	1,54
R1234yf_156	12,35	387,84	40,39	1,50	1,53
R1234yf_157	10,78	384,99	40,42	1,50	1,51
R1234yf_158	28,85	369,85	50,08	1,50	1,44
R1234yf_159	23,66	360,00	50,14	1,50	1,52
R1234yf_160	19,79	352,32	50,20	1,50	1,57
R1234yf_161	15,23	342,93	50,21	1,50	1,56
R1234yf_162	13,79	339,76	50,23	1,50	1,54
R1234yf_163	23,75	308,95	60,20	1,50	1,53
R1234yf_164	28,14	318,61	60,35	1,50	1,44
R1234yf_165	4,49	577,74	-0,73	3,00	2,91
R1234yf_166	7,79	580,61	-0,69	3,00	2,92
R1234yf_167	11,77	583,85	-0,62	3,00	2,91
R1234yf_168	15,68	587,00	-0,55	3,00	2,90
R1234yf_169	19,30	589,64	-0,42	3,00	2,89
R1234yf_170	28,11	595,62	-0,04	3,00	2,86
R1234yf_171	7,79	536,67	9,16	3,00	3,01
R1234yf_172	4,85	533,69	9,16	3,00	3,00
R1234yf_173	11,71	540,64	9,17	3,00	3,03

R1234yf_174	5,74	534,52	9,17	3,00	3,00
R1234yf_175	15,64	544,52	9,17	3,00	3,03
R1234yf_176	19,43	548,21	9,20	3,00	3,05
R1234yf_177	28,97	557,10	9,24	3,00	3,02
R1234yf_178	29,31	512,48	19,70	3,00	3,01
R1234yf_179	23,30	505,83	19,76	3,00	3,04
R1234yf_180	19,40	501,26	19,80	3,00	3,04
R1234yf_181	15,58	496,79	19,83	3,00	3,02
R1234yf_182	11,69	492,23	19,84	3,00	3,00
R1234yf_183	7,29	486,91	19,86	3,00	2,96
R1234yf_184	6,46	485,91	19,87	3,00	2,96
R1234yf_185	29,31	469,41	29,70	3,00	3,00
R1234yf_186	23,04	461,47	29,74	3,00	3,04
R1234yf_187	19,20	456,31	29,77	3,00	3,03
R1234yf_188	13,34	448,38	29,78	3,00	3,00
R1234yf_189	9,13	442,42	29,80	3,00	2,95
R1234yf_190	8,35	441,33	29,81	3,00	2,95
R1234yf_191	29,44	423,52	40,15	3,00	2,91
R1234yf_192	19,10	407,56	40,18	3,00	2,96
R1234yf_193	15,34	402,44	40,21	3,00	3,15
R1234yf_194	12,03	397,29	40,23	3,00	3,21
R1234yf_195	4,51	604,93	-0,55	8,00	8,03
R1234yf_196	5,52	605,79	-0,53	8,00	8,04
R1234yf_197	7,41	607,51	-0,51	8,00	8,07
R1234yf_198	11,46	611,00	-0,46	8,00	8,11
R1234yf_199	15,08	613,89	-0,42	8,00	8,10
R1234yf_200	19,03	617,08	-0,35	8,00	8,13
R1234yf_201	28,37	624,50	-0,23	8,00	8,14
R1234yf_202	28,51	582,25	9,39	8,00	7,99
R1234yf_203	21,53	575,33	9,45	8,00	7,95
R1234yf_204	18,03	571,79	9,48	8,00	7,93
R1234yf_205	14,69	568,40	9,50	8,00	7,90
R1234yf_206	7,44	560,93	9,51	8,00	7,80
R1234yf_207	5,50	559,05	9,52	8,00	7,81
R1234yf_208	4,83	558,62	9,53	8,00	7,86
R1234yf_209	28,66	536,12	19,97	8,00	7,83
R1234yf_210	21,58	528,90	20,01	8,00	7,92
R1234yf_211	18,54	525,76	20,06	8,00	7,98
R1234yf_212	14,41	521,23	20,09	8,00	7,99
R1234yf_213	10,97	517,41	20,11	8,00	8,00
R1234yf_214	6,84	512,88	20,12	8,00	8,02
R1234yf_215	28,78	493,62	29,91	8,00	7,86
R1234yf_216	21,02	485,21	29,96	8,00	8,13