

WAS SIND A2L-KÄLTEMITTEL UND WARUM BRAUCHEN WIR SIE?

von Stephen Spletzer

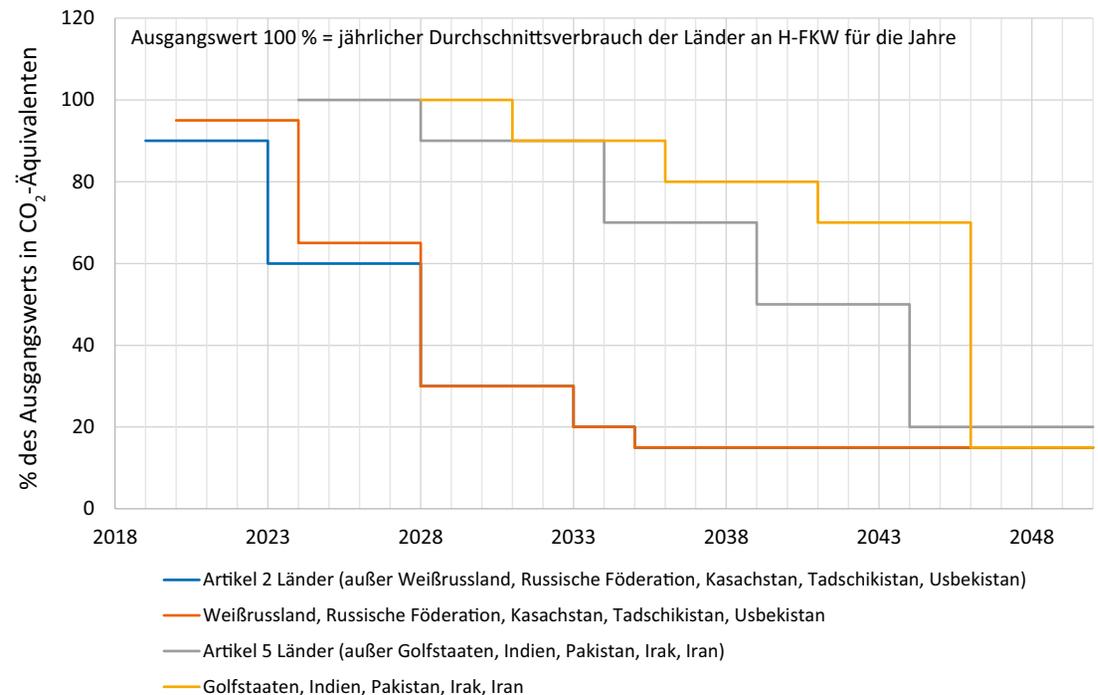




Einführung

Globale, kontinentale, nationale oder sogar regionale Vorschriften, die zur Bekämpfung des Klimawandels erlassen wurden, erfordern den Umstieg der Kälte- und Klimatechnik auf Kältemittellösungen mit verringertem Treibhauspotenzial (Global Warming Potential, GWP). Auf internationaler Ebene hat das Kigali-Amendment zum Montrealer Protokoll die Rahmenbedingungen für einen weltweiten schrittweisen Ausstieg aus der Verwendung von H-FKW-Kältemitteln, basierend auf Ausgangsmengen und Zeitrahmen für den Ausstieg festgelegt (Abbildung 1). Im Endergebnis müssen die teilnehmenden Länder ihren nach GWP-gewichteten Verbrauch an FKW/ H-FKW auf 15 bis 20 % des jeweils definierten Ausgangswerts reduzieren. Stand April 2019

Abbildung 1 – Zeitrahmen für den Ausstieg gemäß Kigali-Amendment





wurde das Kigali-Amendment von 60 Ländern ratifiziert und trat am 1. Januar 2019 in Kraft.

Die Vorgaben des Kigali-Amendment werden derzeit in vielen Teilen der Welt in regionale und nationale Regelungen überführt. Die Kigali vorausgegangene Europäische F-Gase-Verordnung hat bereits eine schrittweise Reduktion des H-FKW-Verbrauchs in Europa festgelegt, die an anwendungsspezifische GWP-Grenzwerte gebunden ist, die in den nächsten Jahren in Kraft treten werden. Japan und Kanada haben ebenfalls anwendungsspezifische GWP-Grenzwerte definiert. In den USA hat die EPA verschiedene SNAP-Regeln verabschiedet, die Alternativen mit verringertem GWP zulassen. Andere Länder und Regionen entwickeln unterschiedliche Ansätze. Allen gemeinsam ist jedoch, dass der GWP der in der Kälte- und Klimatechnik verwendeten Kältemittel signifikant reduziert werden muss, um die regulatorischen Anforderungen zu erfüllen.

Es wurden innovative neue Kältemittel wie Hydrofluorolefine (HFOs) entwickelt, die einen signifikant verringerten GWP-Wert besitzen als H-FKW. Diese und andere Alternativen, z. B. Kohlenwasserstoffe, Blends etc., sind mehr oder weniger brennbar. Daher hat sich die Kälte- und Klimatechnik in den letzten Jahren auf den Einsatz brennbarer Kältemittel vorbereitet. Der vorliegende Bericht gibt einen Überblick über einige neuentwickelte Low-GWP-Kältemittel und nennt Schlüsselfaktoren, die beim Umgang mit brennbaren Kältemitteln berücksichtigt werden müssen. Sicherheitsklassen und Brennbarkeitsparameter sowie ihre Auswirkungen auf die Kältemittelwahl werden ebenfalls behandelt. Zudem werden die Auswirkungen von Vorschriften und Normen beleuchtet.

Die richtige Balance finden

Fluorkohlenwasserstoffe (FKW, H-FKW) – Produkte wie R-134a, R-404A und R-410A – dienten fast drei Jahrzehnte lang als Ersatzkältemittel für die Ozonschicht zerstörende Kältemittel wie FCKW oder H-FCKW. Viele dieser Ersatzstoffe besitzen jedoch einen relativ hohen GWP-Wert und stehen daher im Fokus regulatorischer Anstrengungen zur Reduktion des Umwelteinflusses von Kältemittlemissionen. Mehrere nicht brennbare, auf der HFO-Technologie basierende Kältemittel mit verringertem GWP wurden entwickelt (Tabelle 1) und erfolgreich im Markt eingeführt, darunter Opteon™ XP41 (R-463A), XP40 (R-449A), XP44 (R-452A), XP10 (R-513A) sowie XP30 (R-514A). Während diese Produkte auf Grund ihrer höheren Kälteleistung und deutlich geringeren GWP-Werte einen signifikanten Beitrag zur Reduktion der Treibhausgasemissionen von Kälte- und Klimaanlageanlagen leisten, erfüllen einige von ihnen nicht die strengsten regulatorischen Vorgaben, die einen GWP von weniger als 150 erfordern. Derzeit gibt es keine nicht brennbaren Very-Low-GWP-Alternativen mit Drücken vergleichbar R-22, R-404A und R-410A. Für zahlreiche bestehende Anwendungen muss die

Branche daher auf brennbare Optionen, z. B. Opteon™ XL Produkte, zurückgreifen, um zukünftige regulatorische Anforderungen zu erfüllen (s. A2L-Alternativen in Tabelle 1).

Alternativen zu bestehenden H-FKW mit hohem GWP sind bereits seit Jahrzehnten im Einsatz. Industriegase wie Kohlenwasserstoffe, Ammo-

niak (R-717) und CO₂ besitzen einen geringen GWP und finden immer häufiger Verwendung. Diese Produkte bringen jedoch auch Einschränkungen mit sich. So sind Kohlenwasserstoffe hoch brennbar (Sicherheitsklasse A3 gemäß ISO 817-2014, vgl. auch ANSI/ASHRAE Norm 34-2016), was ihren Einsatz üblicherweise auf geringe Kältemittelfüllmengen in steckerfertigen

Tabelle 1 – Kältemittelalternativen mit verringertem GWP*

Standardkältemittel (GWP)	Nicht brennbare Alternativen - Klasse 1 (GWP)	Gering brennbare Alternativen - Klasse 2L (GWP)
R-123 (79)	R-1233zd (1) Opteon™ XP30 - R-514A (2)	-----
R-134a (1300)	R-450A (547) Opteon™ XP10 - R-513A (573)	Opteon™ XL10 - R-1234yf (<1) R-1234ze (<1)
R-22 (1760) R-404A (3943)	R-448A (1273) Opteon™ XP40 - R-449A (1282) Opteon™ XP44 - R-452A (1945)	Opteon™ XL40 - R-454A (238) Opteon™ XL20 - R-454C (146)
R-410A (1924)	Opteon™ XP41 - R-463A (1377)	R-32 (677) Opteon™ XL55 - R-452B (676) Opteon™ XL41 - R-454B (467)

*GWP-Werte basieren auf AR5 (100 Jahre)

Anlagen beschränkt. Ammoniak besitzt eine höhere Toxizität und ist gering brennbar (Sicherheitsklasse B2L), und es ist nicht mit allen Werkstoffen verträglich. Es kommt vor allem in industriellen Anwendungen zum Einsatz. CO₂ ist nicht brennbar, es erfordert jedoch hohe Druckbereiche und besitzt eine relativ niedrige kritische Temperatur (31 °C), was den Einsatz und die Effizienz in bestimmten geographischen Regionen beeinträchtigt. Zudem erfordern die genannten Produkte signifikante Designänderungen im Vergleich zu bestehenden H-FKW-Systemen.

Angesichts der für Industriegase geltenden Einschränkungen und mangels nicht brennbarer Alternativen mit sehr niedrigem GWP-Wert für zahlreiche Anwendungen waren neue und andere Lösungen erforderlich. Die Branche fragte sich, ob neue Kältemittel entwickelt werden könnten, die die gegensätzlichen Anforderungen an Kälte- und Klimasysteme besser ausbalancieren? Lassen sich Substanzen finden, die einen sehr niedrigen GWP besitzen und zugleich die mit dem Einsatz hoch brennbarer Kältemittel verbundenen Risiken reduzieren und im Gegensatz zu den Industriegasen nur geringfügige

Anlagenmodifikationen erfordern? Die Antwort auf diese Fragen ist „Ja!“

HFO sind neu in der Kälte- und Klimatechnik. Während sie innerhalb von Kälte- und Klimasystemen chemisch stabil sind, werden sie in der Atmosphäre schnell abgebaut und besitzen daher einen sehr niedrigen GWP und einen geringen Umwelteinfluss. Einige HFO besitzen sogar einen noch niedrigeren GWP als Industriegase wie CO₂. Einige HFO sind nicht brennbar (Sicherheitsklasse A1), erfordern jedoch geringe Drücke, vergleichbar mit R-123. Andere sind gering brennbar (Sicherheitsklasse A2L) und erfordern mittlere Drücke, ähnlich wie R-134a. Auch wenn HFO vielversprechende Low-GWP-Alternativen zu FKW und H-FKW sind, besitzen sie eine deutlich geringere Kälteleistung als derzeit verwendete Produkte mit hohen Druckbereichen (z. B. R-22, R-404A oder R-410A) und können diese in zahlreichen Anwendungen nicht direkt ersetzen. Daher werden sie oft mit H-FKW zu Blends mit verringertem GWP gemischt (z. B. Opteon™). Viele dieser Blends sind gering brennbar (Sicherheitsklasse A2L).



Es gibt zwei Hauptgruppen von brennbaren Kältemitteln, die die Anforderungen an Alternativen mit verringertem GWP für zahlreiche Kälte- und Klimaanwendungen erfüllen: A3-Kältemittel (z. B. Kohlenwasserstoffe) und A2L-Kältemittel, vor allem H-FKW R-32, HFO und HFO-basie-

rende Blends. Auch wenn alle oben genannten Produkte brennbar sind, bestehen teils große Unterschiede in der Sicherheitsklasse und den Brennbarkeitsparametern. Sie haben Einfluss auf ihre sichere Verwendung und die damit in Zusammenhang stehenden relativen Gefahren.

Sicherheitsklassen und Brennbarkeitsparameter

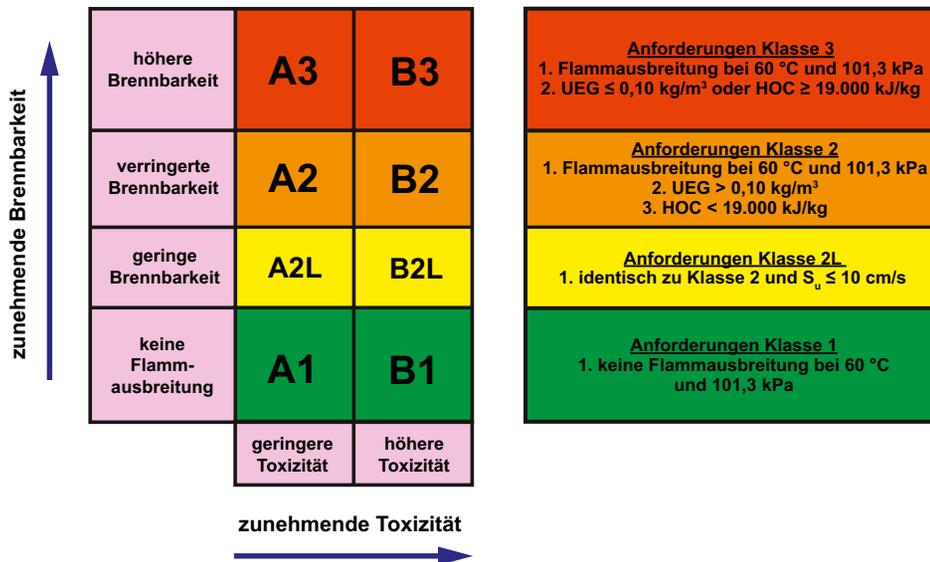
Die Sicherheitsklassen für Kältemittel basieren auf den in ISO 817-2014 und ANSI/ASHRAE Standard 34-2016 festgelegten Anforderungen an Toxizität und Brennbarkeit. Die Toxizität ist in zwei Klassen unterteilt: A steht für geringere, B für höhere Toxizität. Kältemittel mit einer höheren Toxizität wie R-123 und R-717 sind üblicherweise auf indirekte Systeme beschränkt, z. B. Chiller in separaten Maschinenräumen. Die Brennbarkeit ist in vier verschiedene Klassen unterteilt: Klasse 1, Klasse 2L, Klasse 2 und Klasse 3. Kohlenwasserstoffe wie Propan oder Isobutan sind in die Sicherheitsklasse A3 eingestuft. Zahlreiche HFO und HFO-basierende Blends sowie einige H-FKW sind in die Sicher-

heitsklasse A2L eingestuft. *Abbildung 2* gibt eine Übersicht über die verschiedenen Sicherheitsklassen für Kältemittel und erläutert die Kriterien für die Beurteilung der Brennbarkeit.

Eine Voraussetzung für die Einstufung als brennbares Kältemittel (Sicherheitsklassen 2L, 2 und 3) ist, dass bei Tests gemäß ASTM E681, *Standard Test Method for Concentration Limits of Flammability of Chemicals (Vapours and Gases)* (2002) eine Flammausbreitung auftritt. Es ist jedoch zu beachten, dass sich einige der auf Grund der fehlenden Flammausbreitung als nicht brennbar und damit in Sicherheitsklasse 1 eingestuft Kältemittel bei Kontakt mit offe-

nem Feuer zersetzen können. Betrachtet man die Testanforderungen für jede Klasse ist es für Außenstehende schwer zu beurteilen, wie die einzelnen Klassen das Anlagendesign und die Sicherheit beeinflussen. Die Testanforderungen nennen auch einige Brennbarkeitsparameter, darunter Untere Entzündbarkeitsgrenze (UEG), Verbrennungswärme (HOC, Heat of Combustion) sowie Brenngeschwindigkeit (S_d). Ein Vergleich von Brennbarkeitsparametern ist unerlässlich, um den relativen Einfluss verschiedener Kältemittel auf Anlagendesign und Sicherheit objektiv zu beurteilen. *Tabelle 2* zeigt die wichtigsten Brennbarkeitsparameter sowie die Eigenschaften von R-1234yf, R-32 und R-290. R-1234yf

Abbildung 2 – Sicherheitsklassen und Anforderungen für die Einstufung



ist ein HFO, R-32 ein H-FKW. Beide sind in die Sicherheitsklasse A2L eingestuft und kommen als Ersatz für Kältemittel mit hohem GWP oder als Bestandteil von Blends zum Einsatz. R-290 bzw. Propan (Sicherheitsklasse A3) ist ein Kohlenwasserstoff, der z. B. bereits seit vielen Jahren in steckerfertigen gewerblichen Gefriertruhen Verwendung findet.

Entzündbarkeitsgrenzen, ASTM E681 und ASTM D3065

Entzündbarkeitsgrenzen werden mit Hilfe der oben genannten Testmethode ASTM E681 ermittelt. Alle brennbaren Kältemittel, ob gering (A2L) oder hoch (A3) brennbar, zeigen eine Flammausbreitung und besitzen daher eine untere (UEG bzw. LFL – Lower Flammability Limit) und obere

Entzündbarkeitsgrenze (OEG bzw. UFL – Upper Flammability Limit). Diese Grenzen definieren die minimale bzw. maximale Konzentration einer Substanz in Luft, die zu einer Flammausbreitung führen kann. Unterhalb der UEG ist die Konzentration nicht hoch genug, um eine Flamme aufrechtzuerhalten. Oberhalb der OEG ist die Konzentration zu hoch, und es ist zu wenig Sauerstoff in der Luft. Je niedriger die UEG, desto höher die Gefahr, weil eine Leckage schneller zu einer brennbaren Konzentration führen kann. Je größer der Unterschied zwischen OEG und UEG, desto breiter ist das Fenster an möglichen Konzentrationen, bei denen es zu einer Entzündung kommen kann. Wie *Tabelle 2* zeigt besitzt R-290 eine signifikant niedrigere UEG als R-32 und R-1234yf. Daher ist die Wahrscheinlichkeit, dass nach einer Leckage eine zündfähige Konzentration entsteht, bei R-290 potenziell höher. Da Kohlenwasserstoffe in die Sicherheitsklasse A3 eingestuft sind und somit üblicherweise niedrigere Entzündbarkeitsgrenzen besitzen als A2L-Kältemittel, ist dies ein durchaus übliches Verhalten. Zudem besitzen diese Moleküle generell eine niedrigere Molmasse als A2L-Moleküle. Dies bedeutet, dass schon eine geringere Menge ausreicht, um eine zündfähige Konzentration zu erreichen. Dies ist

Tabelle 2 – Brennbarkeitsparameter verschiedener Kältemittel

Kältemittel, ASHRAE-Bezeichnung	R-1234yf	R-32	R-290
ASHRAE-Sicherheitsklasse	A2L	A2L	A3
Untere Entzündbarkeitsgrenze (UEG) (Vol.-% in Luft / kg/m ³)	6,2/0,289	14,4/0,307	2,2/0,038
Obere Entzündbarkeitsgrenze (OEG) (Vol.-% in Luft)	12,3	29,3	10,0
OEG - UEG (Vol.-% in Luft)	6,1	14,9	7,8
Mindestzündenergie (MZE) (mJ)	> 5.000	30 - 100	0,25
Brenngeschwindigkeit (S _u) (cm/s)	1,5	6,7	46
Verbrennungswärme (HOC) (kJ/g)	10,7	9,4	46,3

wichtig für das Anlagendesign, denn es hat wesentlichen Einfluss auf die Füllmenge.

Der mögliche Einfluss der unterschiedlichen UEG bei Leckageszenarien lässt sich mit Hilfe von ASTM D3065, *Standard Test Methods for Flammability of Aerosol Products* (2001), leichter veranschaulichen. Diese Norm sieht einen Test zur Prüfung der Flammenlänge vor, um das möglicherweise von einem Aerosol ausgehende Brandrisiko zu beurteilen. Dazu wird das Aerosol mit Hilfe einer Sprühflasche über einer brennenden Kerze versprüht. Entsteht eine Flamme, wird

ihre Ausdehnung gemessen und aufgezeichnet. R-1234yf, R-32 und R-290 wurde mit Hilfe dieser Methode getestet. Wurde die Flasche beim Sprühen in aufrechter Position gehalten, wurde die Kerze von allen drei Kältemitteln gelöscht. Auch wenn die Kältemittelkonzentrationen nicht gemessen wurden, kann daraus geschlossen werden, dass das über die Flamme gesprühte Kältemittel-Luft-Gemisch in allen drei Fällen vor dem Erlöschen der Kerze nicht die UEG erreicht hat. Da es sich um Mittel- bis Hochdruckkältemittel handelt, hat sich das Gemisch jeweils mit hoher Geschwindigkeit bewegt und so ver-

mutlich zum Löschen der Flamme beigetragen. In einem zweiten Szenario wurde die Sprühflasche so gedreht, dass das Kältemittel nicht als Dampf, sondern als Flüssigkeit in die Düse gelangt. Dies führte zu einem Anstieg der Kältemittelkonzentration im Sprühstrahl. Bei beiden A2L-Produkten (R-1234yf und R-32) wurde die Kerze in allen Testdurchgängen gelöscht. Dies lässt wiederum darauf schließen, dass die UEG nicht erreicht wurde, während die Flamme noch brannte. Bei Propan (R-290) dagegen entstand eine große Flamme wie in *Abbildung 3* zu sehen. Dies deutet darauf hin, dass hier ein zündfähiges Kältemittel-Luft-Gemisch entstanden ist. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass A2L-Kältemittel zwar schwerer zu entzünden sind als A3-Kältemittel. Eine offene Flamme kann aber jedes brennbare Kältemittel entzünden, sobald eine brennbare Konzentration in Luft vorliegt.

Mindestzündenergie & ASTM E582

Die Mindestzündenergie (MZE) ist ein weiterer wichtiger Brennbarkeitsparameter, den es bei der Auslegung von Kälteanlagen zu berücksichtigen gilt. Die Mindestzündenergie ist die niedrigste

Abbildung 3 – Bestimmung der Flammenlänge (gem. ASTM D3065) an R-290



Energie, die ausreicht, um ein zündfähiges Brennstoff-Luft-Gemisch zu entzünden. Zündquellen mit einer geringeren Zündenergie führen nicht zu einer Entzündung. Kohlenwasserstoffdämpfe sind sehr leicht entzündlich, manchmal reichen schon geringste Energiemengen, z. B. durch statische Entladung. *Abbildung 4* zeigt Momentaufnahmen einer Entzündung von Propan bei 1 mJ gemäß ASTM E582-2013. Wie in *Tabelle 2* dargestellt, ist die MZE von R-290 um Größenordnungen niedriger als der Wert, der zur Zündung von A2L-Kältemitteln erforderlich ist. Dieser Unterschied ist ein wichtiger Faktor für die Sicherheit und das Anlagendesign, denn Bauteile, die für A3-Kältemittel eine mögliche Zündquelle

darstellen, stellen bei A2L-Kältemitteln oft keine Gefahr dar. Dies wird im Abschnitt **Branchenaktivitäten & Bedeutung für Vorschriften und Normen** näher erläutert.

Brenngeschwindigkeit & Butanfeuerzeugtests

Die laminare Brenngeschwindigkeit S_u ist die „maximale Geschwindigkeit (in./s [cm/s]), mit der sich eine ebene Flamme senkrecht zu ihrer Oberfläche in einem ruhenden Gemisch aus Luft und Brennstoff ausbreitet“ (ANSI/ASHRAE 34-2016). Diese Eigenschaft wird zur Klassifizierung von A2L Kältemitteln verwendet, deren Brenngeschwindigkeit ≤ 10 cm/s betragen muss. Aus *Tabelle 2* ist ersichtlich, dass R-290 wie andere Kohlenwasserstoffe einen signifikant höheren S_u -Wert besitzt als A2L-Kältemittel. Dies hat Auswirkungen auf die Sicherheit, denn höhere Brenngeschwindigkeiten können auch ein höheres Risiko bedeuten. Eine Entzündung von A3 Kältemitteln mit höherer Brenngeschwindigkeit kann zu einer schnelleren Flammausbreitung führen. Daraus kann ein schnellerer Druckanstieg resultieren, was wiederum die Heftigkeit des Ereignisses erhöht.

Abbildung 4 – Aufnahmen eines Tests mit 1 mJ zur Bestimmung der Mindestzündenergie von R-290

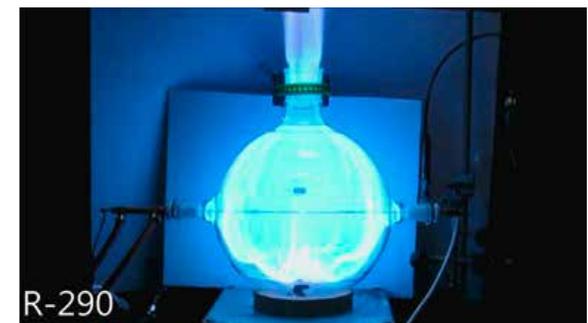
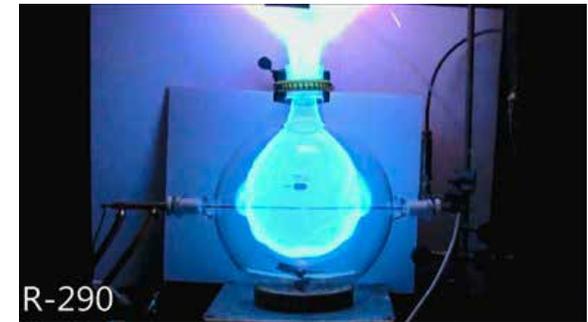


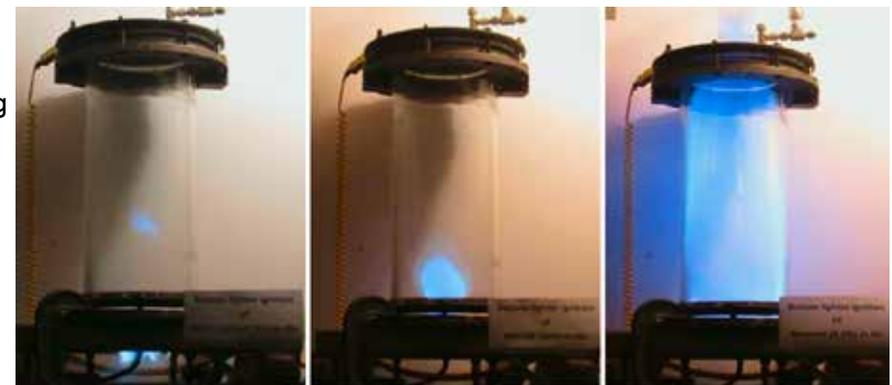
Tabelle 3 – Kältemittelkonzentrationen für den Butanfeuerzeugtest

Kältemittel, ASHRAE-Bezeichnung	R-1234yf	R-32	R-290
ASHRAE-Sicherheitsklasse	A2L	A2L	A3
Stöchiometrische Konzentration (Vol. %)	7,73	17,32	4,02
Testkonzentration (Vol. %)	9,0	19,0	4,2
Kältemittelfüllmenge im Test (g)	5,12	4,93	0,92

Auch wenn sie nicht explizit zur Bestimmung der Brenngeschwindigkeit oder des Druckanstiegs aufgenommen wurden, können nebeneinander gestellte Bilder aus Videos von Butanfeuerzeugtests einen Eindruck der unterschiedlichen Brenngeschwindigkeiten und Druckanstiege verschiedener Kältemittel vermitteln. Bei diesem Versuchsaufbau wird ein entflammtes Butanfeuerzeug von unten in einen mit einem brennbaren Kältemittel gefüllten vertikalen Behälter eingebracht. Die Flamme wandert im Inneren des Behälters nach oben und hebt einen lose auf der Testanordnung aufliegenden Gummistopfen an, um den Druckanstieg auszugleichen. „Worst-Case-Konzentrationen“ von R-1234yf, R-32 und R-290, die geringfügig über dem für jedes Kältemittel geltenden stöchiometrischen

Wert lagen, wurden in den Behälter eingebracht und entzündet. *Tabelle 3* fasst die in den Tests verwendeten Konzentrationen zusammen. Die Füllmengen der A2L-Produkte waren mehr als fünfmal so hoch wie die Füllmenge für R-290. *Abbildung 5* zeigt die Versuchsanordnung für

Abbildung 5 – Butanfeuerzeugtest bei 0,083 s nach der Entzündung (R-1234yf [links], R-32 [Mitte], R-290 [rechts])



jedes Kältemittel 0,083 s nach der Entzündung. Zu diesem Zeitpunkt hat R-1234yf mit der niedrigsten Brenngeschwindigkeit die kleinste Flamme erzeugt. R-32, das mit 6,7 cm/s eine höhere Brenngeschwindigkeit besitzt, entwickelt eine größere Flammausbreitung. Bei R-290, das eine signifikant höhere Brenngeschwindigkeit besitzt, hat die Flamme bereits den gesamten Behälter eingenommen, ist an der Oberseite ausgetreten und über den Sichtbereich der Kamera hinausgegangen. Bereits vorher hat der durch die Entzündung von R-290 bedingte Druckanstieg den Gummistopfen mit hoher Geschwindigkeit aus dem Behälter geschleudert, so dass er von der Oberseite des Laborabzugs abgeprallt ist. Der Vollständigkeit halber muss gesagt werden,

dass die Flamme bei jeder Kältemittelentzündung den gesamten Behälter eingenommen und der Druckanstieg den Stopfen angehoben hat. Bei R-1234yf und R-32 breiteten sich die Flammen jedoch viel langsamer aus und der Stopfen wurde nur leicht angehoben und landete auf der Behälteroberseite anstatt gegen den Laborabzug geschleudert zu werden.

Verbrennungswärme, Hot Surface Ignition Temperature & Glühdrahtprüfung

Die Verbrennungswärme (HOC, Heat of Combustion) ist die Wärme pro Masseneinheit, die bei der Verbrennung eines Stoffes freigesetzt wird. Je höher der HOC-Wert, desto größer ist das Risiko, denn dies kann bei einer Entzündung zu höheren Temperaturen führen und das Ausmaß verschlimmern. R-290 besitzt einen ca. 4,5- bis 5-mal höheren HOC-Wert als A2L-Kältemittel.

Ein weiterer, bisher noch nicht genannter Parameter für die Brennbarkeit eines Kältemittels, der derzeit von der Kälteindustrie untersucht wird, ist die so genannte Hot Surface Ignition Temperature (HSIT). Brennbare

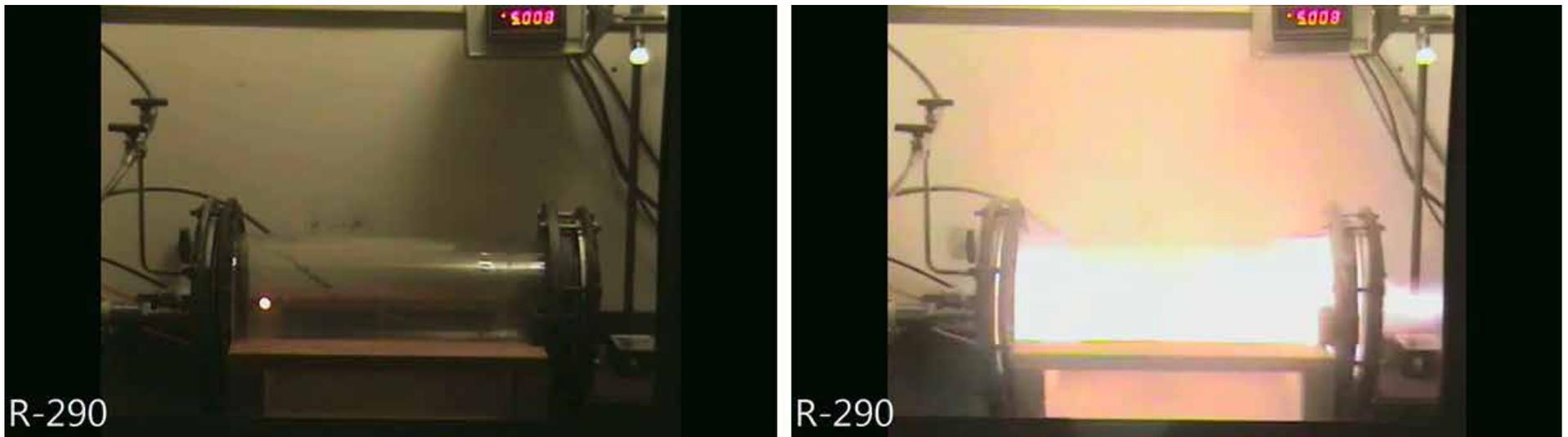
Kältemittel können sich bei Kontakt mit heißen Oberflächen entzünden. Dies muss z. B. bei der Auswahl von elektrischen Widerstandsheizungen für den Einsatz in einer Kälte- oder Klimaanlage beachtet werden. Obwohl kein HSIT-Test, kann eine Glühdrahtprüfung dazu verwendet werden, die Auswirkungen eines elektrischen Heizgeräts auf eine bestimmte Kältemittelkonzentration zu simulieren. Es wurden Versuche mit R-1234yf, R-32 und R-290 durchgeführt. „Worst-Case-Konzentrationen“ jedes Kältemittels wurden in einen horizontalen Behälter eingebracht (Tabelle 4). Dabei waren die Füllmengen der A2L-Kältemittel 4,5- bis 5-mal so hoch wie die von Propan. Ein Glühdraht wurde zwei Minuten bzw. solange erhitzt, bis es zur Zündung kam. Ein Gummistopfen auf der

rechten Seite des Behälters dient zum Druckausgleich im Fall einer Zündung. Der Glühdraht erreicht Temperaturen von ca. 500 bis 700 °C. Bei R-1234yf und R-32 wurde der Draht zwei Minuten lang erhitzt, ohne dass es zu Zündungen kam. Bei R-290 jedoch wurde 3,53 s nach Aktivierung des Glühdrahts eine Zündung ausgelöst. Die in *Abbildung 6* dargestellten Momentaufnahmen zeigen den Beginn des Versuchs (links) sowie den Zustand 0,066 s nach erstmaligem Auftreten einer Flamme (rechts).

Tabelle 4 - Kältemittelkonzentrationen für die Glühdrahtprüfung

Kältemittel, ASHRAE-Bezeichnung	R-1234yf	R-32	R-290
ASHRAE-Sicherheitsklasse	A2L	A2L	A3
Stöchiometrische Konzentration (Vol. %)	7,73	17,32	4,02
Testkonzentration (Vol. %)	8,13	20,0	4,5
Kältemittelfüllmenge im Test (g)	3,28	3,68	0,70

Abbildung 6 - Glühdrahtprüfung mit R-290 (Testbeginn [links], 0,066 s nach erstmaligem Auftreten einer Flamme [rechts])



Branchenaktivitäten & Bedeutung für Vorschriften und Normen

In den letzten Jahren wurden große Anstrengungen unternommen, um den sicheren Einsatz brennbarer Kältemittel und die Unterschiede in der Brennbarkeit verschiedener Sicherheitsklassen (z. B. A2L vs. A3) besser zu verstehen. Die Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen dienen als Basis für die Schaffung von Vorschriften

und Normen für die gesamte Kälte- und Klimatechnik. Sie haben direkten Einfluss auf die Kältemittelfüllmengen und andere Maßnahmen, die dazu beitragen, das mit Kältemittelleckagen verbundene Risiko zu minimieren oder zu eliminieren.

So berücksichtigt z. B. ISO 5149-1 (2014) die unterschiedlichen Sicherheitsklassen bei der Festlegung von Höchstfüllmengen. Sie legt variable Grenzwerte für m_1 , m_2 und m_3 fest, die an verschiedene Risikominderungsmaßnahmen gebunden sind, wobei sich die Obergrenzen an den UEG der einzelnen Kältemittel orientieren.

Für brennbare A2L-Kältemittel liegen diese Obergrenzen um einen Faktor von 1,5 höher als für Kältemittel der Sicherheitsklassen A2 und A3, „unter Berücksichtigung der geringeren Brenngeschwindigkeiten dieser Kältemittel, die ein geringeres Entzündungs- und Explosionsrisiko mit sich bringen“. *Tabelle 5* zeigt Beispiele für mögliche, auf den in ISO 5149 festgelegten Grenzwerten basierenden Füllmengen für die in diesem Bericht getesteten Kältemittel. Die Füllmengen bei den A2L-Kältemitteln sind circa 11- bis 12-mal höher als bei Propan. Zahlreiche weitere Sicherheitsstandards sehen ebenfalls Höchstfüllmengen vor, die auf den UEG der Kältemittel basieren. Daher können mehr Anwendungen für A2L-Kältemittel entwickelt werden als für A3-Kältemittel.

Eine kürzlich von der AHRI durchgeführte Untersuchung (AHRI-Report Nr. 8017-2017) beschäftigt sich mit möglichen Zündquellen in Wohngebäuden. Sie kam zu dem Schluss, dass viele übliche Zündquellen nicht zu einer Entzündung von A2L-Kältemitteln führen würden – mit Ausnahme der folgenden: glühender Draht, Sicherheitszündholz, Einbringen einer Feuerzeugflamme und direkt auf einer Kerzenflamme gerichtete Leckage. Derzeit werden Sicherheitsstandards entwickelt, die zwischen Zündquellen für A2L-Kältemittel und solchen für A2- und A3-Kältemittel unterscheiden. So enthält die 6. Ausgabe der IEC 60335-2-40 von 2018 Hilfen zur Entscheidung, ob ein bestimmtes Bauteil eine Zündquelle für ein A2L-Kältemittel darstellt. Sie basieren auf dem Einsatz von flammen-

sicheren Einhausungen, dem Erstickungseffekt und der Größe der Öffnung bzw. der Höhe der elektrischen Schaltlast. Da zahlreiche Bauteile, die eine potenzielle Zündquelle für A3-Kältemittel sein können, für A2L-Kältemittel keine Zündquellen darstellen, steht eine größere Auswahl an elektrischen Bauteilen für die Auslegung von Systemen mit schwer entflammbar A2L-Kältemitteln zur Verfügung. Darüber hinaus gibt es derzeit weitere Arbeiten, die darauf abzielen, den Einsatz von brennbaren Kältemitteln in Kälte- und Klimaanwendungen weiter voranzutreiben.

Tabelle 5 - Beispiele für Höchstfüllmengen auf Basis von ISO 5149 (2014)

ASHRAE #	R-1234yf	R-32	R-290
Sicherheitsklasse	A2L	A2L	A3
m₁ (kg)	1,734	1,842	0,152
m₂ (kg)	11,271	11,973	0,988
m₃ (kg)	56,355	59,865	4,940



Schlussfolgerungen

Aktuelle Regelungen zur Verringerung der Auswirkungen von Kältemittlemissionen auf die Umwelt zwingen die Kälte- und Klimatechnik zum Einsatz von brennbaren Kältemitteln. Hinsichtlich ihrer Eigenschaften besitzen die gering brennbaren A2L-Kältemittel günstigere Brennbarkeitsparameter als A3-Kältemittel. Dies ermöglicht höhere Füllmengen sowie eine einfachere Integration von elektrischen Bauteilen in das Anlagendesign. Dank der

Entwicklung von A2L-Kältemitteln (z. B. die Produkte der Opteon™ XL Reihe) ist die Kälte- und Klimatechnik in der Lage, die strengen GWP-Vorgaben in einer noch größeren Zahl von Anwendungen zu erreichen. Es wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, um die Unterschiede in der relativen Sicherheit der Kältemittel aufzuzeigen und zu demonstrieren, wie sie sicher eingesetzt werden können. Letztendlich hängt der erfolgreiche Einsatz

von brennbaren Kältemitteln davon ab, dass die Erkenntnisse aus dieser Forschung in Bezug auf Vorschriften und Produkt- bzw. Sicherheitsnormen richtig integriert werden. Darüber hinaus sind in der Kälte- und Klimatechnik umfangreiche Schulungsmaßnahmen erforderlich, vor allem im Servicebereich.

Über Opteon™ Kältemittel



Das Opteon™ Kältemittelportfolio bietet eine optimale Kombination aus Nachhaltigkeit, Leistung, Sicherheit und Kosteneffizienz und trägt dazu bei, die Anforderungen aktueller Verordnungen zu erfüllen und gesteckte Geschäftsziele zu erreichen.

Vor allem in Europa treibt die Opteon™ XL Reihe an Kältemitteln mit sehr niedrigem GWP die von der F-Gase-Verordnung geforderte Umstellung voran und ermöglicht Kunden die Wahl der für sie am besten geeigneten Lösung hinsichtlich Leistung, Sicherheit, Nachhaltigkeit und Gesamtbetriebskosten.

Unternehmen vertrauen auf Opteon™ Kältemittel, denn diese bieten:

Geringen GWP:

Bis zu 99 % geringerer GWP als herkömmliche Kältemittelgenerationen.

Kein Ozonabbaupotenzial:

Die HFO-basierende Kältemittelfamilie besitzt kein Ozonabbaupotenzial.

Einfache Umstellung:

Minimiert Kosten für die Umstellung und Stillstandszeiten.

Sehr gute Kälteleistung:

Ähnliche Kälteleistung wie zahlreiche H-FCKW- und H-FKW-basierende Technologien.

Energieeffizienz:

Geringerer Energieverbrauch ermöglicht langfristige Kostensenkungen über die gesamte Systemlebensdauer.

Langfristige Einsetzbarkeit:

HFO-basierende Kältemittel können die Anforderungen weltweiter und regionaler Verordnungen erfüllen und übererfüllen.

Anerkannte Expertise:

Dank ihrer 85jährigen Branchenerfahrung können die Kältemittelexperten von Chemours Kunden dabei unterstützen, die aktuellen Regelungen einzuhalten und Höchstleistungen zu erreichen.

Auf [Opteon.com/regulations](https://www.opteon.com/regulations) erhalten sie weitere Informationen zu H-FKW-Ersatzkältemitteln, und Sie können mit unseren Experten Kontakt aufnehmen.



Die hierin gemachten Angaben und Empfehlungen werden kostenlos zur Verfügung gestellt und erfolgen auf der Grundlage der Chemours vorliegenden Informationen. Chemours übernimmt keine Gewährleistung oder Haftung, sei es ausdrücklich oder stillschweigend, für die gemachten Angaben oder Empfehlungen und deren mögliche spätere Verwendung. Die zur Verfügung gestellten Informationen sind nicht als Gewährung einer Lizenz oder als Empfehlung zur Verletzung von Patenten oder Schutzrechten Dritter zu betrachten.

©2019 The Chemours Company FC, LLC. Opteon™ und damit verbundene Logos sind markenrechtlich geschützt für The Chemours Company FC, LLC. Chemours™ und das Chemours Logo sind markenrechtlich oder urheberrechtlich geschützt für The Chemours Company.