

Flammverhalten von und Effizienzbewertung von Kohlenwasserstoffen

Grundlagen für das BAFA Förderprogramm

10/2025



- Planungs- und Berechnungssoftware
- Diagnose, Monitoring- und Messsysteme
- Effizienzmessungen
- Schulungen für natürliche Kältemittel
- Schulungen für Kältemittelstrategien und Energieoptimierung
- Planungen für Anlagenbau und -sanierung



CoolTool Technology GmbH
Info@cooltool-technology.de

Kruppstr. 184
D-47229 Duisburg



CoolTool Technology GmbH, D-47229 Duisburg



Untersuchung zu brennbaren Stoffen

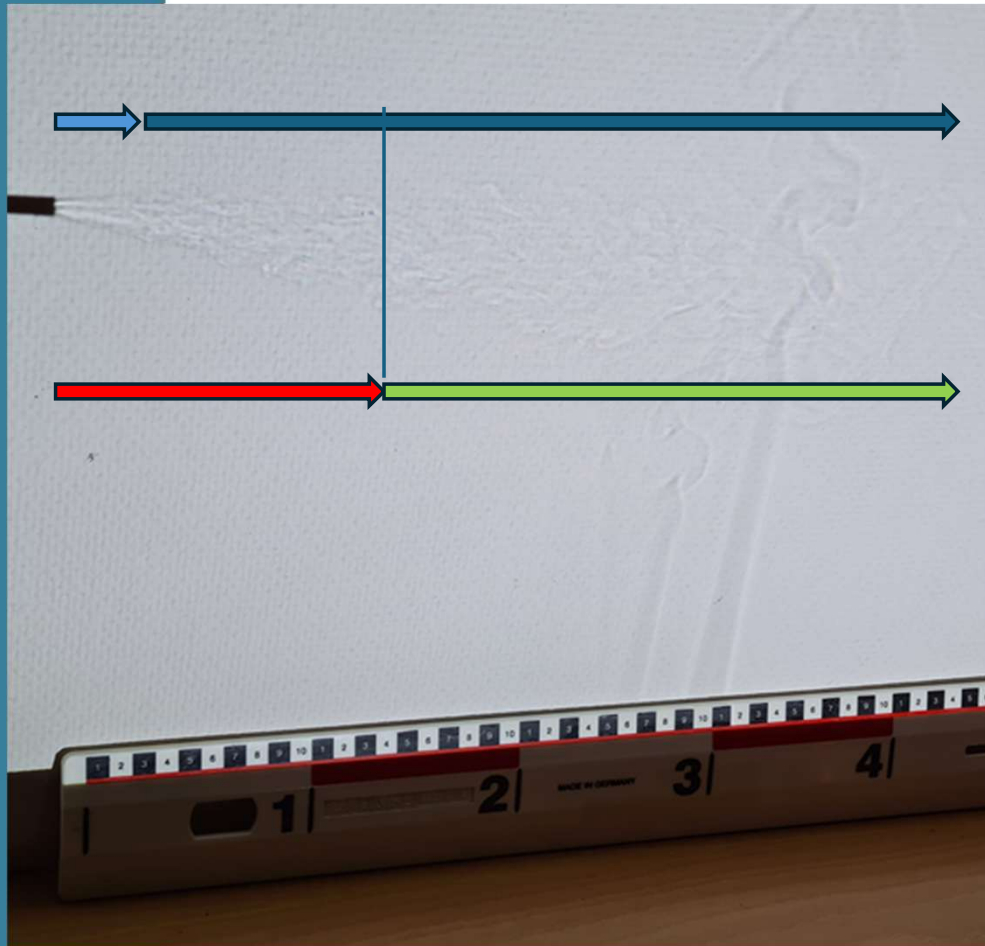
Grundlagen und Stoffeigenschaften



Dichte:	1,8 bis 2,0 kg/m³
Zündfähig bei :	1,7 -> 10,9 Vol %
Konzentration :	38 g/ m³ Unterer Flammpunkt (LFL)
	243 g/ m³ Oberer Flammpunkt (HFL)
	8 g/ m³ „Practical Limit“ (PL)
Leckage Verhalten:	Bildet Nester
	(zusammenhängende Schwaden)
	Fließt eigenständig zu Senken
	Bleibt lange explosionsfähig
Verwendung Kälte:	Für Kältekreisläufe ungeeignet
	Verringerte Energieeffizienz

Untersuchung zu brennbaren Stoffen

Strömungsverhalten



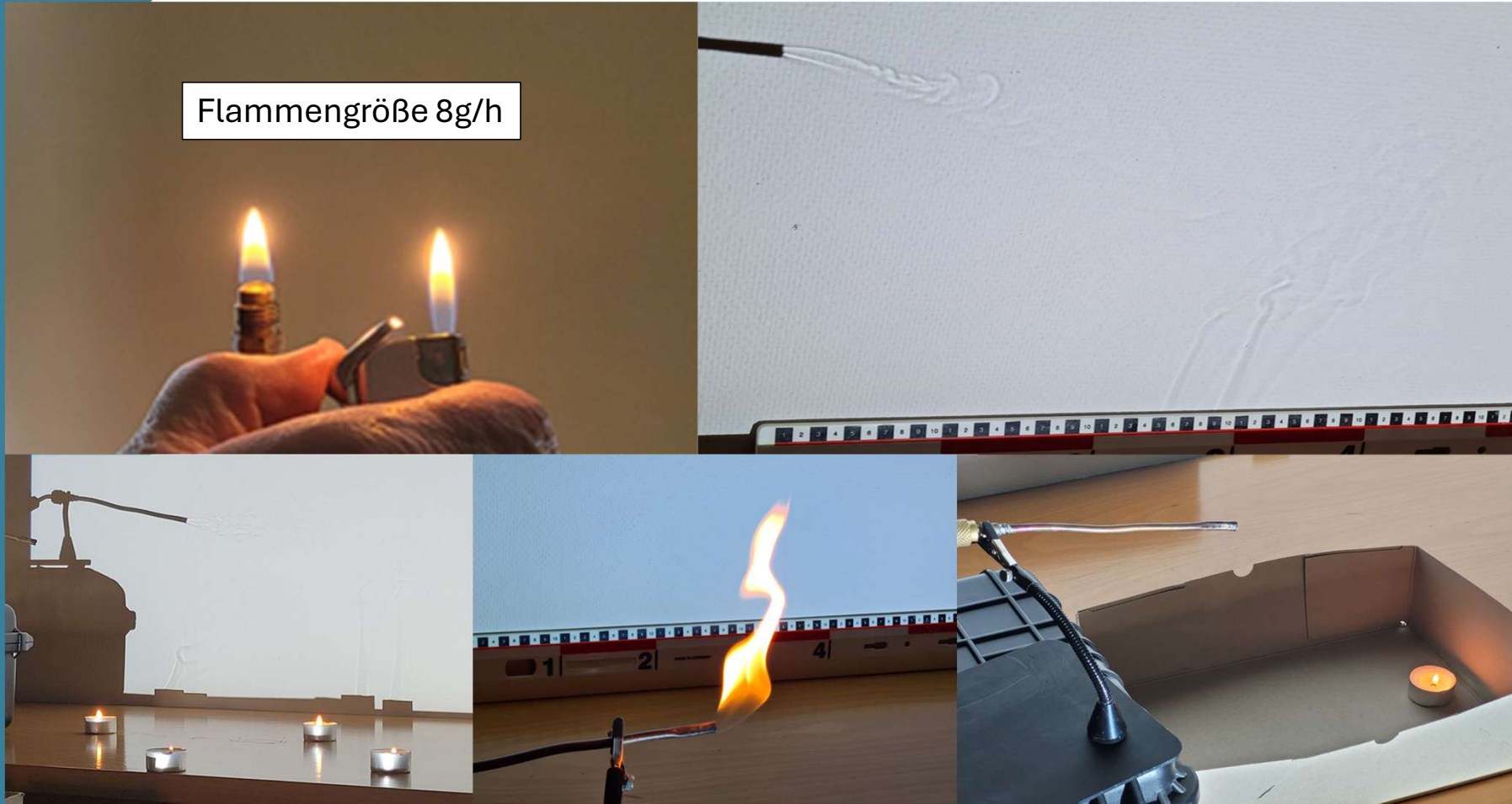
- Strömung geht tendenziell nach unten, da Dichte höher als die von Luft
- Kegelförmiger Austritt mit ca. 20 bis 24° Öffnungswinkel
- Bei $D_{\text{Kegel}} = 10 \times D_{\text{düse}}$ müsste 1% Strömung erreicht werden => LFL unterschritten
- Am Anfang laminarer Bereich bis ca. 4 cm
- Turbulenter Bereich bis ca. 30...35 cm erkennbar.
- Danach keine optische Brechung mehr durch Dichteunterschiede => homogene Mischung mit Luft erreicht

Untersuchung zu brennbaren Stoffen

Strömungsverhalten - Versuchsaufbau



Flammengröße 8g/h

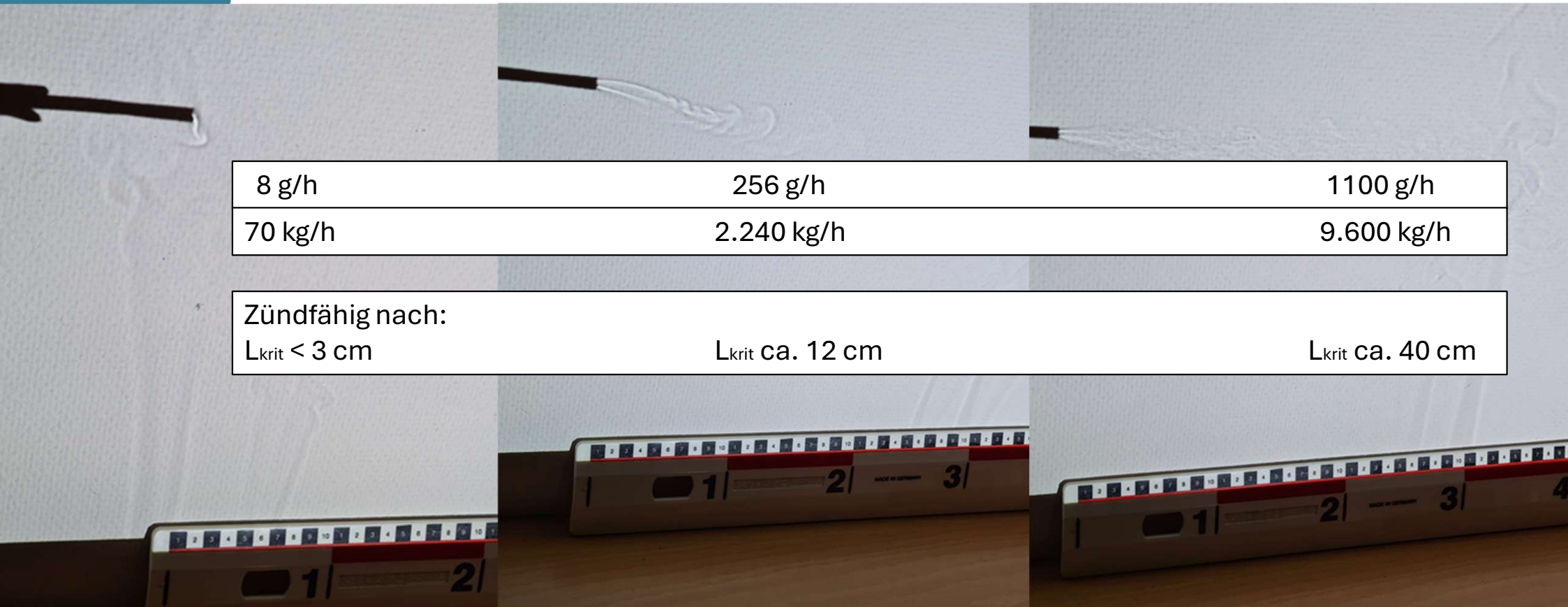


CoolTool Technology GmbH, D-47229 Duisburg



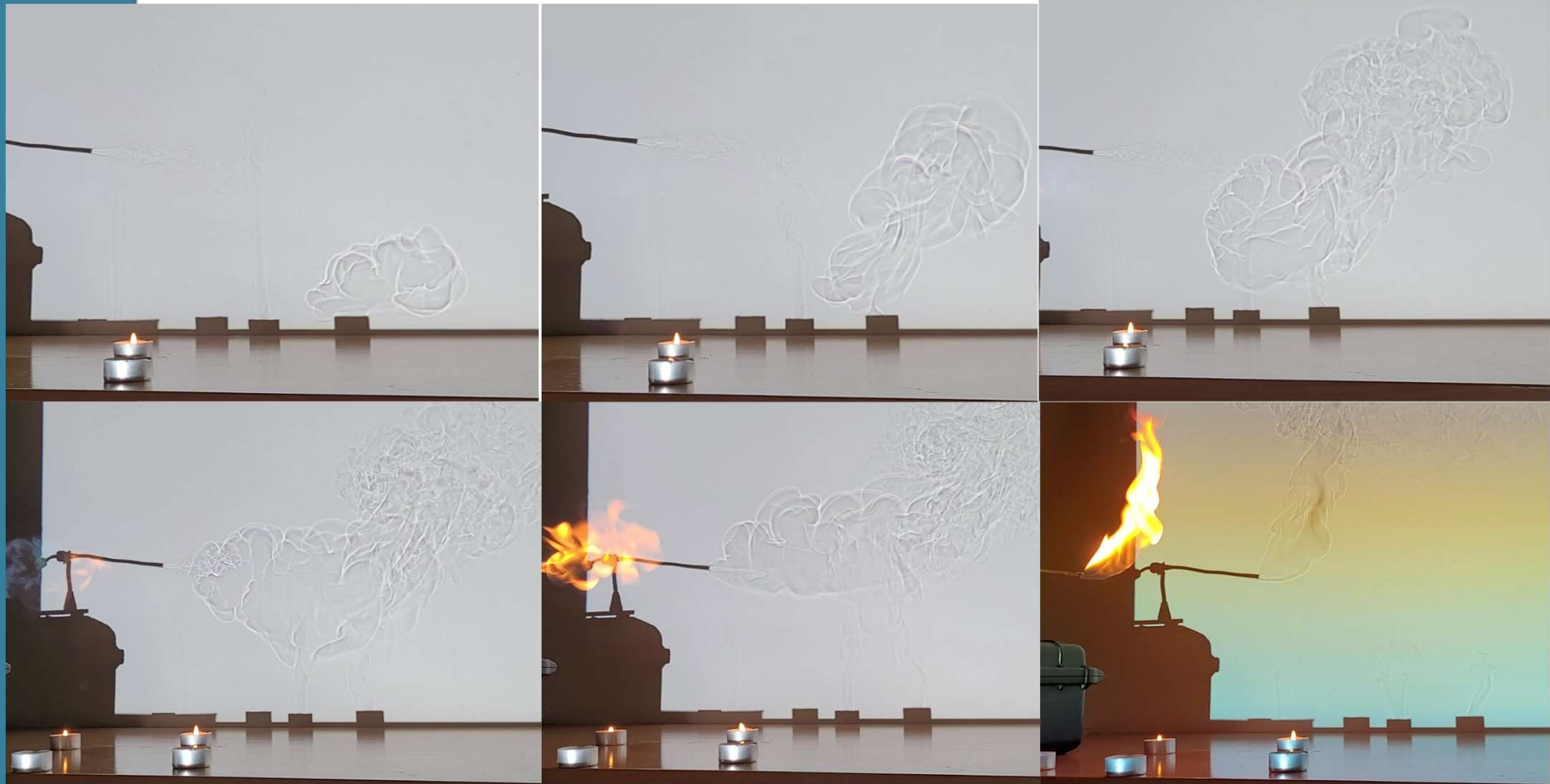
Untersuchung zu brennbaren Stoffen

Strömungsverhalten - Zündabstände



Untersuchung zu brennbaren Stoffen

Provokation einer Explosion



Untersuchung zu brennbaren Stoffen

Provokation einer Explosion



- Karton mit ca. 280 Litern Inhalt
- Zwei Zündquellen
- Fließrichtung ausströmendes Gas auf die Zündquellen
- Eintrag mit ca. 1100 g/h
=> 9600 kg/a
- Keine Zündung bei 90 cm Abstand
- Versuch nach 15 Minuten abgebrochen und K-Strömung mit Flamme an Düse gezündet

Untersuchung zu brennbaren Stoffen

Provokation einer Explosion



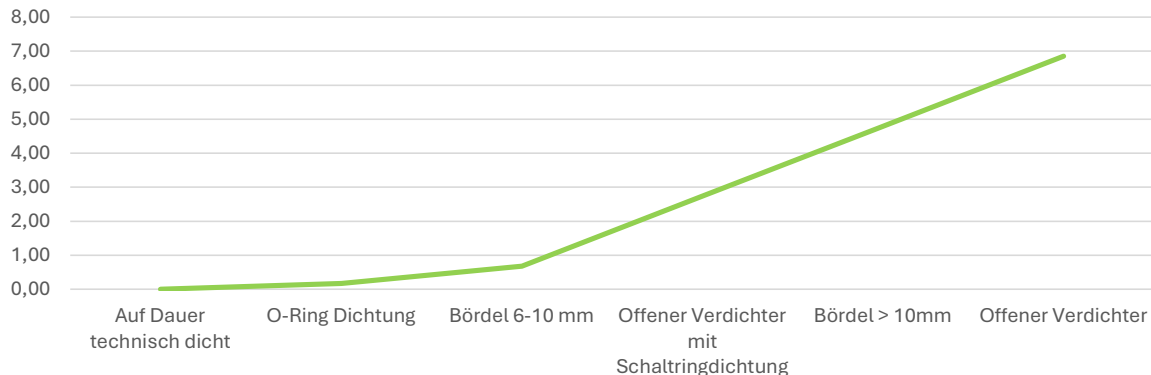
- Karton mit ca. 280 Litern Inhalt
- Unter Ausnutzung des Coanda-Effektes Schwade auf den Boden gebracht
- Eintrag mit ca. 1100 g/h
=> 9600 kg/a
- Zündung nach einigen Minuten
- Verpuffung mit kaum wahrnehmbarem Geräusch
- Keine Druckwelle

Brennbarkeit/Zündfähigkeit von Propan

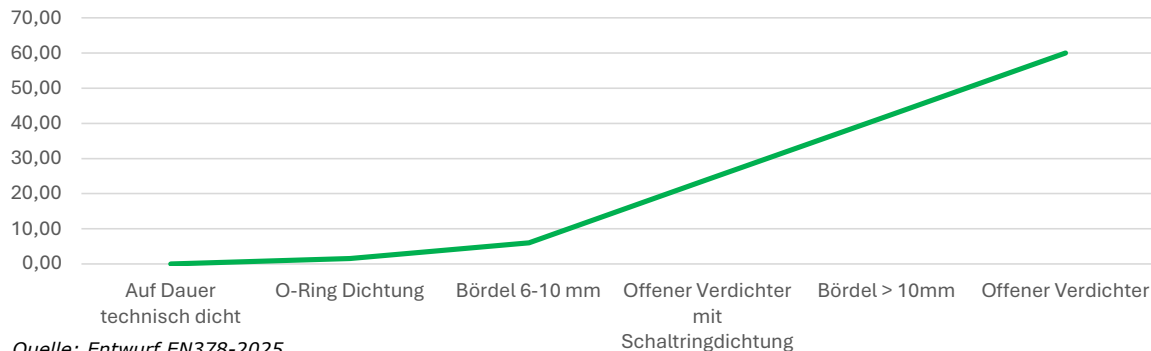
Stand der (zukünftigen) Technik



Leckagerate g/h



Leckagerate kg/a



Quelle: Entwurf EN378-2025

Entwurf der EN 378-2025:

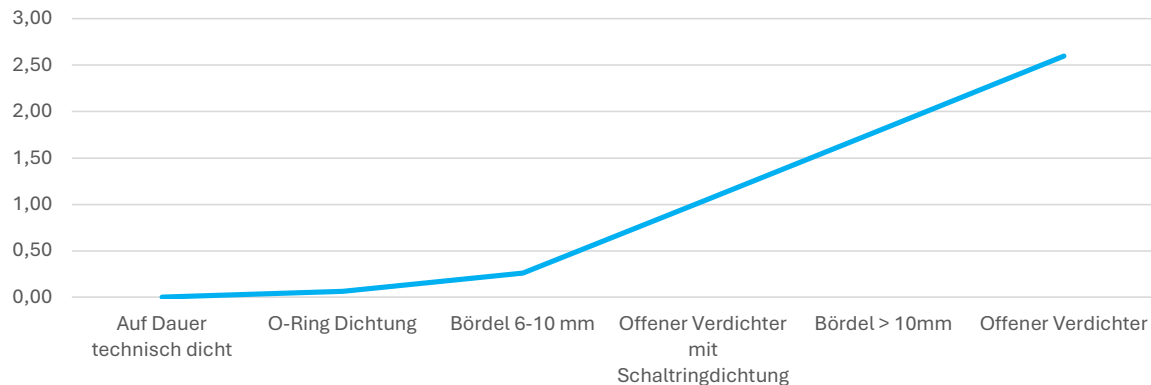
- Nicht gesetzlich bindend
- Entspricht dem Stand der Technik
- Benennung von Leckage Größen
- Berechnung von Leckage Mengen
- Leckage Größen sind in der Praxis leicht auffindbar

Brennbarkeit/Zündfähigkeit von Propan

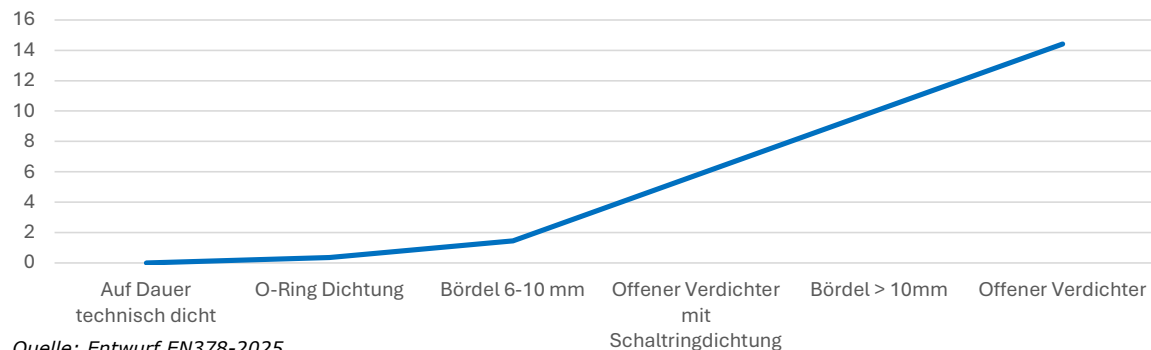
Stand der (zukünftigen) Technik



Notwendige Lüftung m^3/h



Verdünnungsöffnung cm^2



Quelle: Entwurf EN378-2025

Entwurf der EN 378-2025:

- Passive Sicherheit
- Entspricht dem Stand der Technik
- Benennung von notwendiger Lüftungsgröße zur Vermeidung von zündfähigen Atmosphären
- Berechnung von Verdünnungsöffnungen
- Lüftungsgröße und Verdünnungsöffnungen sind in der Praxis leicht realisierbar



CoolTool Technology GmbH, D-47229 Duisburg



Brennbarkeit/Zündfähigkeit von Propan

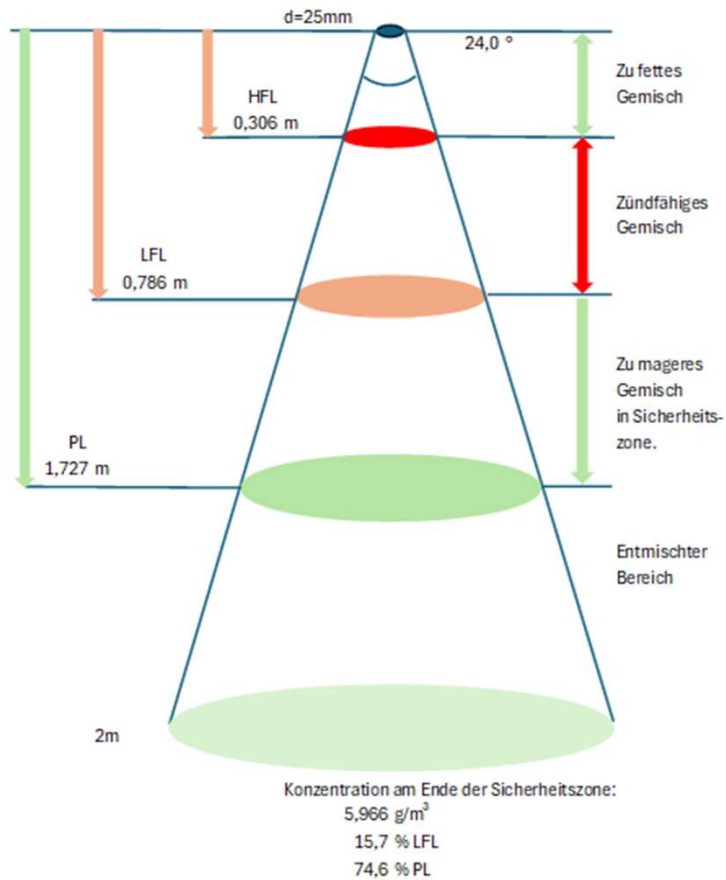
Stand der (zukünftigen) Technik



Entwurf der EN 378-2025:

- Passive Sicherheit durch Füllmengen
- Entspricht dem Stand der Technik
- Höhere Füllmengen werden **explizit als möglich** genannt
- Unterschied:
 - intrinsische Auslegung => nur über Füllmenge
 - extrinsische Auslegung => weitere Absicherung mittels
 - => „auf Dauer technisch dichter“ Ausführung
 - => Überwachung durch Sensoren
 - => mechanische Lüftung

Brennbarkeit/Zündfähigkeit von Propan



Die Berechnung der Konzentrationen im Kegelsind unabhängig von der Ausblaserichtung, da die Schwerkraft keinerlei Einfluß hat.

Auslegung Ausblase Leitung für R 290 Sicherheitsventil nach EN378/13136:

Vom Hersteller angegebener Sicherheitsabstand ist 2m.

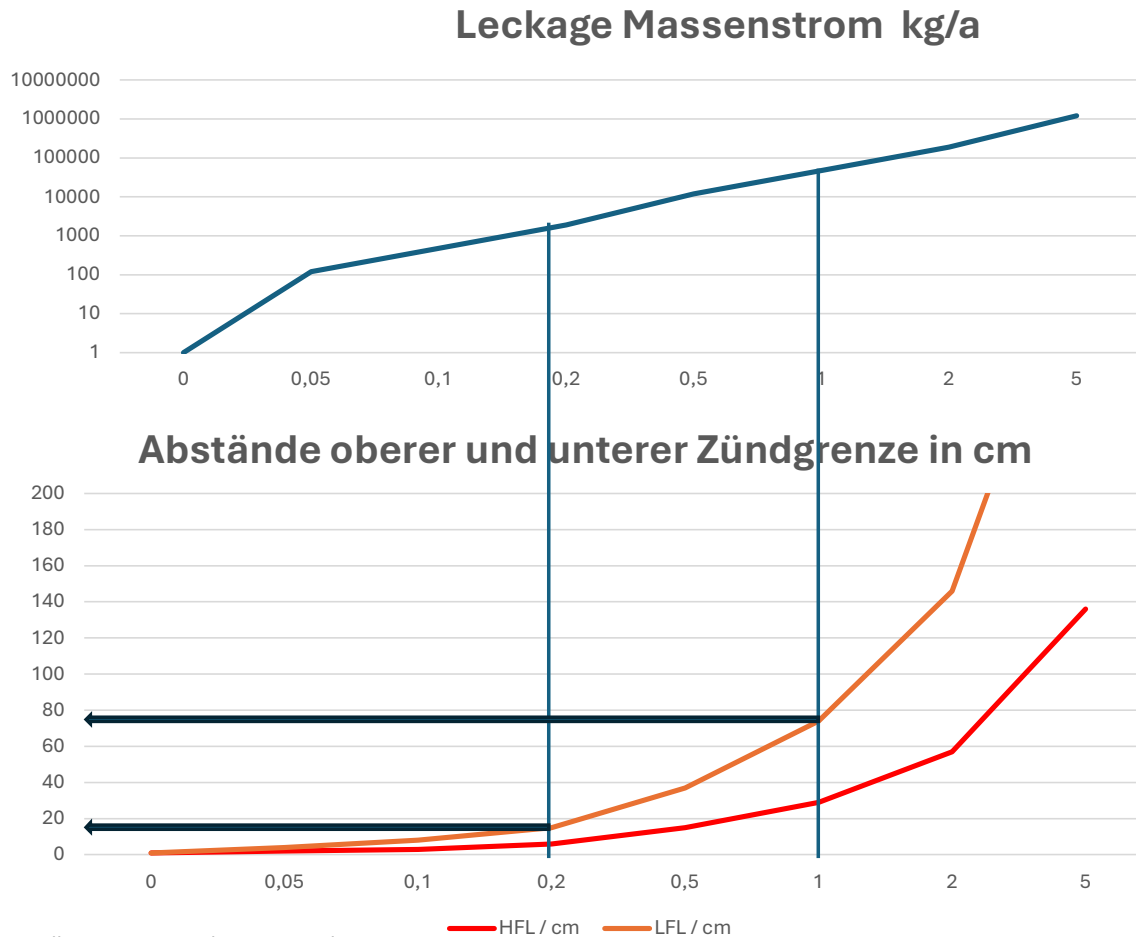
Es werden jeweils

- LFL bei 0,753m
- PL bei 1,656m

erreicht.

Abblase Leistung ca. 8500 to/a

Brennbarkeit/Zündfähigkeit von Propan



In Anlehnung an EN 378/EN 13136
Bestimmung von HFL und LFL:

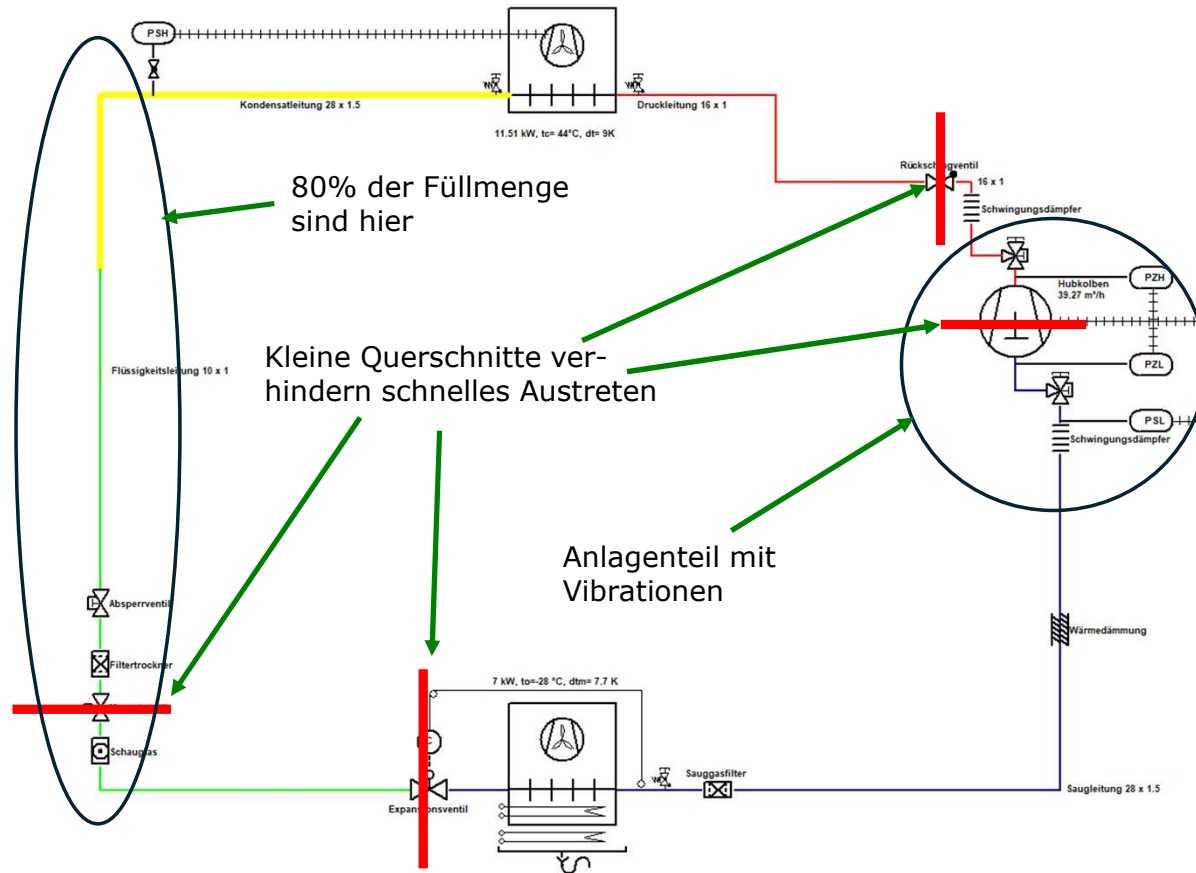
- Passive Sicherheit durch ausreichende Abstände
- Bei „häufiger“ vorkommenden Leckage (EN378-2025) Größen unter 10 cm
- Bei theoretisch möglichen Havarien immer noch unter 100 cm

Auftreten von Leckagen an Kälte- und Klimaanlage



Schnelles Austreten der gesamten Füllmenge ausgeschlossen:

TK-Anlage 7 kW ca. 1800g Füllmenge R290

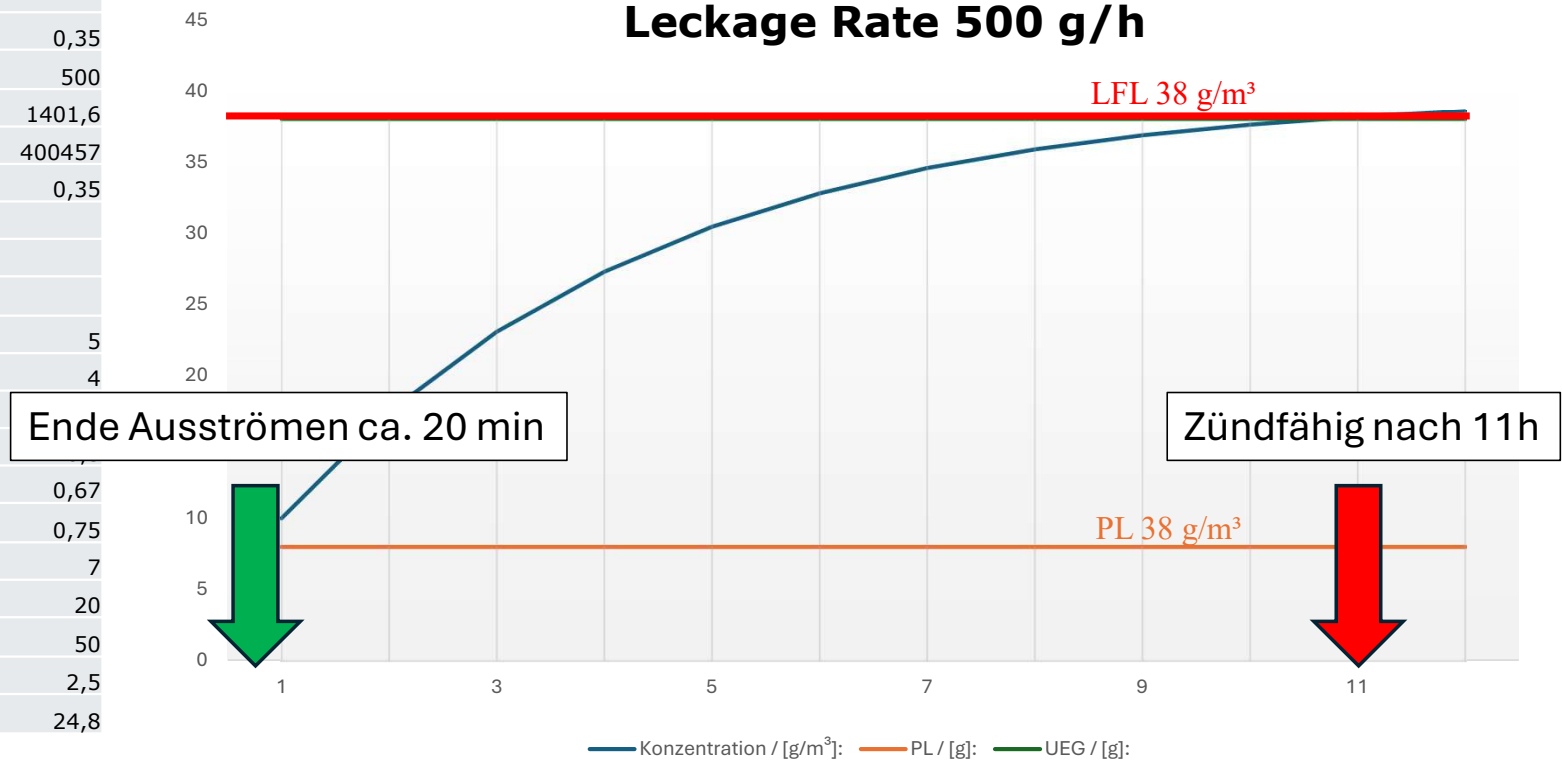


Brennbarkeit/Zündfähigkeit von Propan



Nach EN 378-1	
Füllmenge / [kg]:	0,35
Leckrate / [g/h]:	500
Leckrate / [kg/a]:	1401,6
Leckrate / [%/a]:	400457
Störung nach / [h]:	0,35
Länge / [m]:	5
Breite / [m]:	4
Höhe / [m]:	
Luftwechselrate / [RV/h]:	
Wirkungsgrad Luftwechsel:	0,67
Leckage in Teilvolumen von:	0,75
Mittlere Konzentration / [g/m³]:	7
Grundfläche / [m²]:	20
Raumvolumen / [m³]:	50
Freier Querschnitt / [cm²]:	2,5
Mech. Lüftung / [m³/h]:	24,8

Konzentration im Raum über die Zeit : Leckage Rate 500 g/h



Quelle: Eigene Berechnungen und Messungen



CoolTool Technology GmbH, D-47229 Duisburg



Grundlegende Eigenschaften von brennbaren Stoffen



Sicherheitsdatenblatt

gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH), geändert mit 2015/830/EU

Ethylenglykol $\geq 98\%$, technisch

ABSCHNITT 9: Physikalische und chemische Eigenschaften

9.1 Angaben zu den grundlegenden physikalischen und chemischen Eigenschaften

Aussehen

Aggregatzustand	flüssig (Flüssigkeit)
Farbe	farblos - hellgelb
Geruch	geruchlos
Geruchsschwelle	Es liegen keine Daten vor

Sonstige physikalische und chemische Kenngrößen

Explosionsgrenzen

• untere Explosionsgrenze (UEG)	3,2 Vol.-%
• obere Explosionsgrenze (OEG)	43 Vol.-%
Explosionsgrenzen von Staub/Luft-Gemischen	nicht relevant
Dampfdruck	0,12 hPa bei 25 °C
Dichte	1,11 g/cm ³ bei 20 °C
Dampfdichte	2,14 (Luft = 1)
Schüttdichte	Nicht anwendbar



Grundlegende Eigenschaften von brennbaren Stoffen



	Ethanol C_2H_5OH	Benzin	1,2-Propandiol	Propan C_3H_8
Siedepunkt bei 1 bar	78°C	85°C	101°C	-42°C
Leicht flüchtig bei RT = 22°C	Nein	Nein	Nein	Ja
Schwaden Bildung	Ja	Ja	Ja	Unwahrscheinlich
Explosionsbereich	50 – 330 g/m ³	35 – 326 g/m ³	80 – 400 g/m ³	38 – 238 g/m ³
Zündtemperatur	~400°C	~220-350°C	~420°C	~470°C
Zündenergie	0,28 mJ	0,14 mJ	~2 mJ	0,25 mJ

Brennbarkeit/Zündfähigkeit

Arbeitsunfälle bei BG gelistet



Zahlen für Deutschland 2021

	Arbeitsunfälle	Todesfälle
Arbeit mit Handwerkzeugen	122.302	28
Handhabung von Gegenständen	126.587	33
Transport von Hand	82.743	6
Bedienung einer Maschine	42.842	19
Entflammbare Stoffe*	839	0
Sonstige	129.499	126
Gesamt	730.516	269

* Primär Gastro, Küchen, Kantinen, aber auch KFZ-Bereich, Produktion wie Raffinerien etc., Handwerk wie Dachdecker, Transportmittel wie Stapler, Heizquellen, etc.

Quelle Statistik Arbeitsunfallgeschehen 2021, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V. (DGUV)

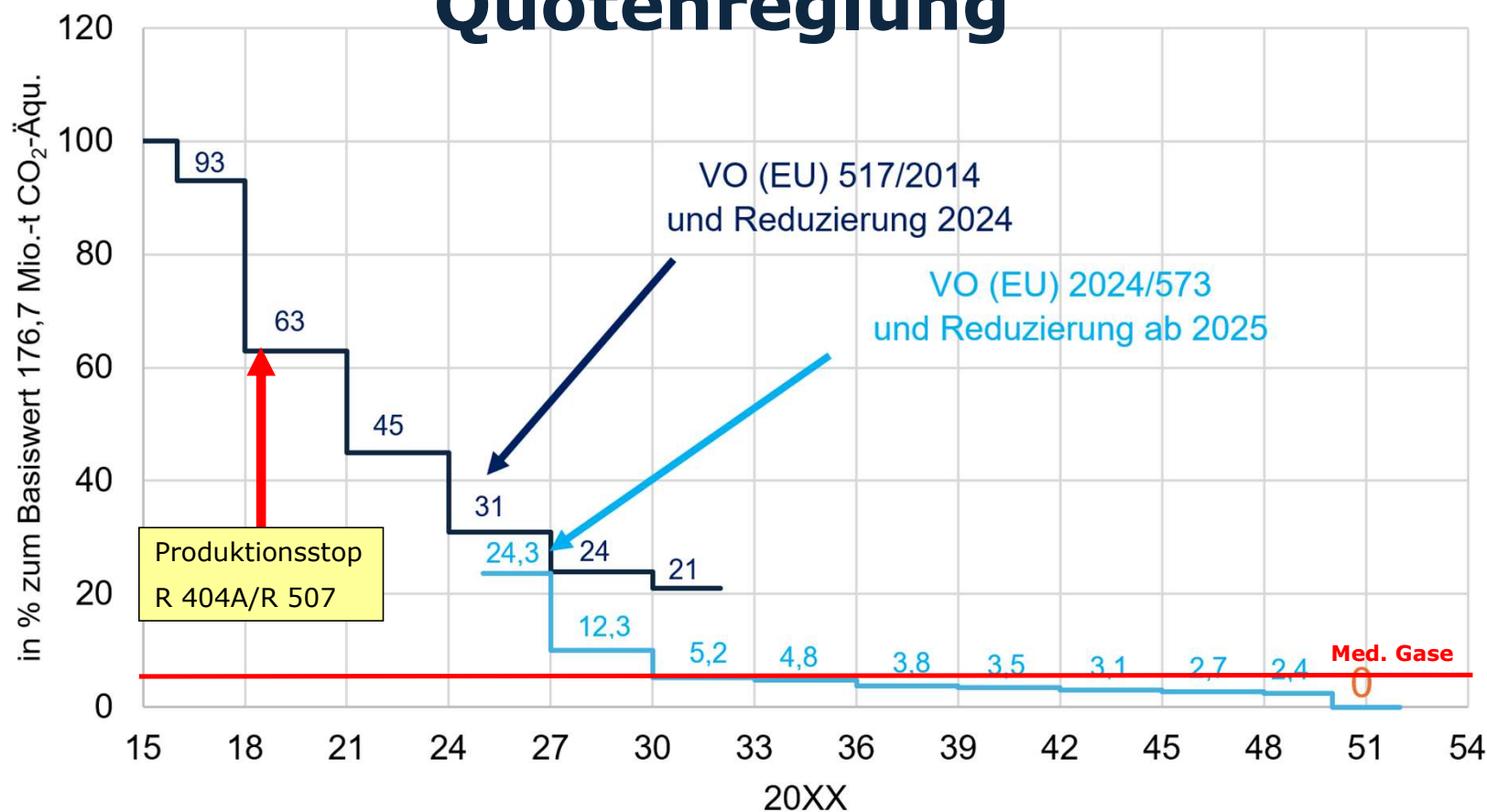


Ausblick in die Zukunft F-Gas Verordnung

Schulung KW-Kältemittel



Quotenregelung



Förderung von stationären Kälte- und Klimaanlage

Umrüstleitfaden - IKKE



2.6 Effizienz-Umrüstung von Kleinanlagen

An bestehenden, kleinen Kompressionskälte- oder -klimaanlagen mit fluorhaltigen Kältemitteln werden folgende Nach- und Umrüstungen zur Steigerung der Energieeffizienz gefördert:

a) verpflichtend

- Umrüstung und Nachrüstung
- Einbau von Verflüssigern
- Einbau von Anlagenteilen

b) optionale

- Einbau von Saugleitungen

Förderung nach Kälte-Klima-Richtlinie

Gefördert wird die Umstellung von halogenierten Kältemitteln mit einem GWP > 100 auf R50, R 170, R 1150, R-290, R-600a, R-1270 und deren Gemische. Aufgrund der Dichteunterschiede zu den halogenierten Kältemitteln ist bei einer Umstellung auf die genannten Ersatzkältemittel mit einer Verringerung der Füllmenge auf ca. 40%, bezogen auf die Füllmenge von halogenierten Kältemitteln, zu rechnen.

Bei Ausbau und Ersatz des Sammlers durch eine geeignete Rohranordnung, z.B. eine fallende Kondensatleitung, kann die Reduzierung der Füllmenge noch höher ausfallen.



halogenierte Kältemittel GWP > 100	Ersatz-Kältemittel
R-22, R-502, R-404A, R-507, R-417A, R-422D, R-407A, R-407C, R-407F, R-407H, R-449A, R-448A, R-452A, R-454A, R-454C, R-455A, etc.	100 % R-290 100 % R-1270
R-12, R-134a, R-513A, R-450A, etc.	40% R-290, 60% R-600a
R23, R508A, R508B, etc.	100% R-170, 100% R-1150
R 14, etc.	100% R-50

Tabelle 1: Liste der möglichen umzurüstenden Kältemittel

Beispiel: 14 kW TK-Zelle

Details bei R290



Im Außenbereich
auch Bördel

Auf Dauer Technisch dicht:
Im Innenbereich nur nicht lösbare
Verbindungen => Hartlöten

Kondensatleitung
als Vorlage für KM

IWÜ bei NK, PK und
AC Anwendungen

In der Kühlzelle/Innenraum
keine mechanischen Teile
mit KM



CoolTool Technology GmbH, D-47229 Duisburg

CoolTool
AC & R technology

Kältetechnische-Anwendungen



Übersicht Vor- und **Nachteile** Ersatz Kältemittel

	R507/404A	R452A	R448/449A	R 455A	R 454C	R290	R1270
	3x	5x	12x	10x	10x	0x	0x
GWP	3922	2141	1597	140	140	3	3
Sicherheitsgruppe	A1	A1	A1	A2L	A2L	A3	A3
Neuanlagen bis	bis 2020	bis 2030	bis 2030	über 2030	über 2030	unbegrenzt	unbegrenzt
PFAS relevant	J	J	J	J	J	N	N
Relative Leistung NK tr = 2°C	100%	102%	99%	99%	91%	96%	115%
Glide to = -8°C	0,5 K	4K	5,6K	11,8K	7,8K	0K	0K
Selektive Öllöslichkeit	N	N	J	J	J	N	N
IWÜ erforderlich/empfohlen	N	N	J	J	J	E	E
Heißgastemperatur tc = 42°C	68°C	74°C	112°C	106°C	104°C	68°C/81°C	78°C/93°C
Relative Leistung TK tr= -20°C	100%	99%	63%	75%	74%	115%	146%
Glide to = -30°C	0,6K	3,9K	5,9K	12,2K	7,7K	0K	0K
Selektive Öllöslichkeit	N	N	J	J	J	N	N
IWÜ erforderlich	N	N	J	J	J	N	N
Nacheinspritzung erforderlich	N	N	J	J	J	N	N
Heißgastemperatur tc = 42°C	88°C	101°C	100°C/150°C	100°C/137°C	100°C/132°C	80°C	98°C

Quelle: Eigene Berechnungen und Messungen



CoolTool Technology GmbH, D-47229 Duisburg



Wärmepumpen-Anwendungen

Übersicht über Vor- und **Nachteile** möglicher Kältemittel



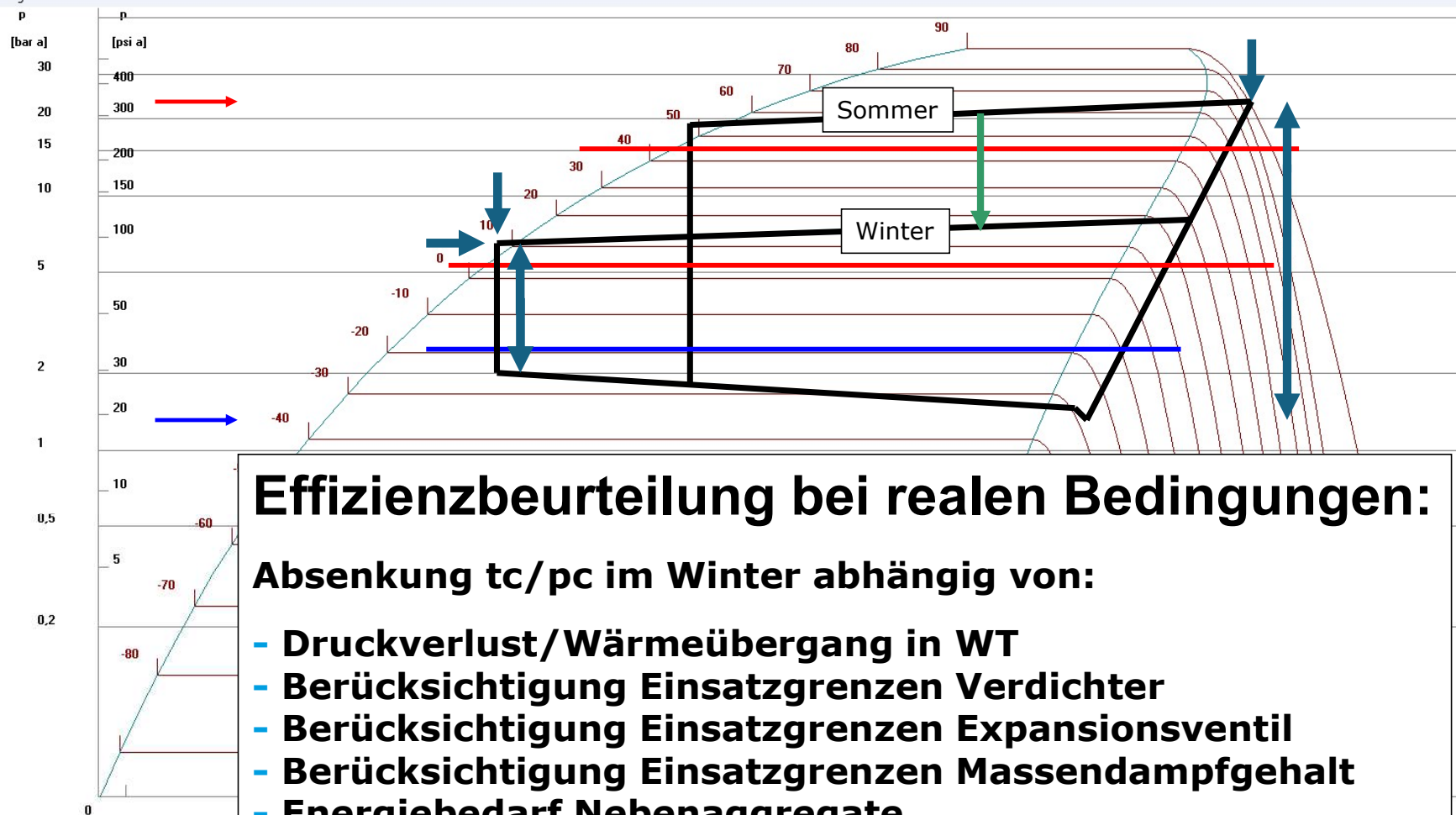
	R407C	R410A	R32	R454C	R290
GWP	1774	2088	675	148	3
Sicherheitsgruppe	A1	A1	A2L	A2L	A3
Neuanlagen bis	bis 2027	bis 2027	bis 2029	bis 2035	unbegrenzt
PFAS relevant	J	J	N	J	N
Relative Leistung A7/W35	72%	100%	111%	65%	64%
Glide to =0°C	6,2K	0,1K	0K	7,6K	0K
Selektive Öllöslichkeit	N	N	N	J	N
IWÜ erforderlich/empfohlen	N	N	N	J	N
Heißgastemperatur	79°C	83°C	105°C	75°C/101°C	61°C
Relative Leistung A-10/W45	68%	100%	117%	60%	65%
Glide to = -18°C	6,6K	0,1K	0K	7,8K	0K
Selektive Öllöslichkeit	N	N	N	J	N
IWÜ erforderlich	N	N	N	J	N
Heißgastemperatur	120°C	122°C	167°C	107°C/129°C	82°C

Quelle: Eigene Berechnungen und Messungen



CoolTool Technology GmbH, D-47229 Duisburg





Effizienzbeurteilung bei realen Bedingungen:

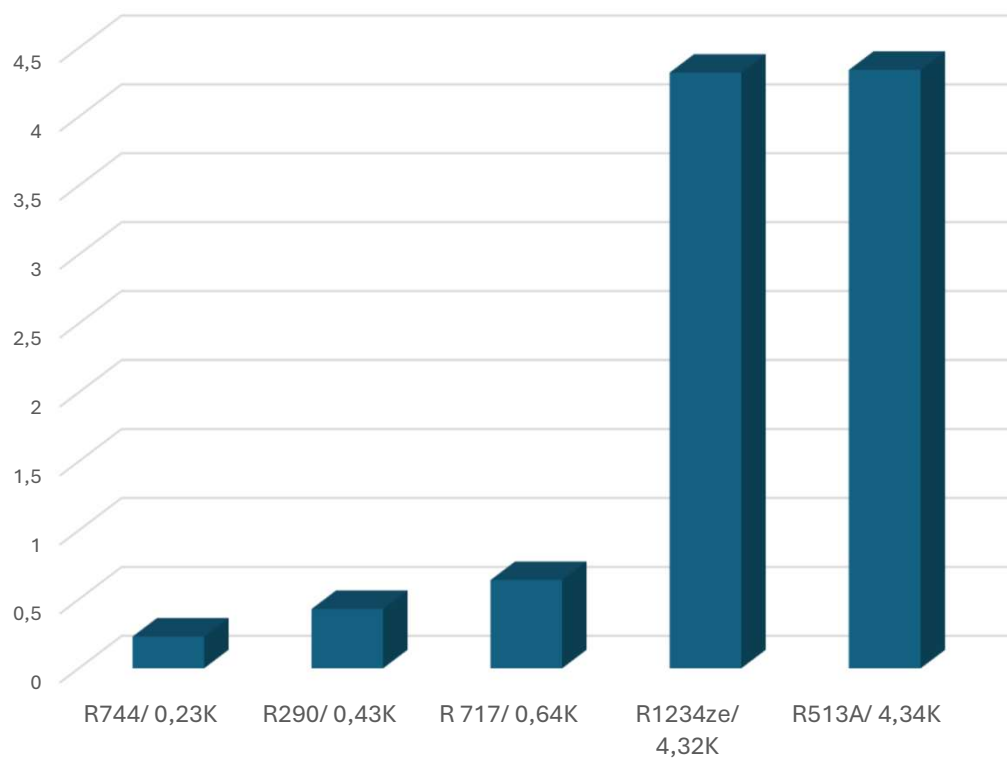
Absenkung t_c/p_c im Winter abhängig von:

- Druckverlust/Wärmeübergang in WT
- Berücksichtigung Einsatzgrenzen Verdichter
- Berücksichtigung Einsatzgrenzen Expansionsventil
- Berücksichtigung Einsatzgrenzen Massendampfgehalt
- Energiebedarf Nebenaggregate
- Heißgastemperatur
- Regelbarkeit Expansionsventil

Auswertungsverfahren und Vorüberlegungen



Druckverlust im selben Wärmeübertrager / [K]



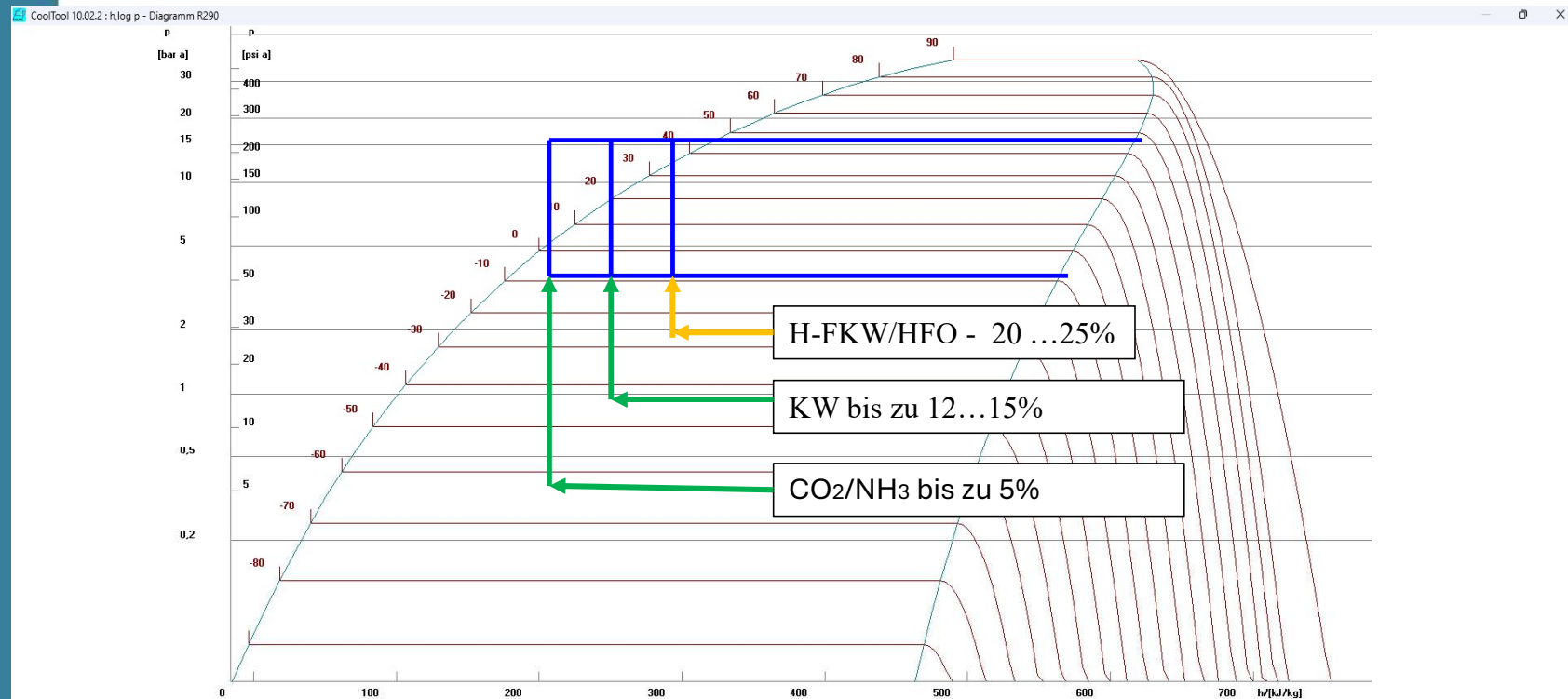
Quelle: Berechnungen mit Herstellersoftware GPC

Gesamtheitliche Betrachtung der Effizienz

- Druckverluste in den Wärmeübertragern
- Verschiebung des Ansaugdruckes bei hohen Druckverlusten nach unten
- Einfluss auf den polytropen Gesamtwirkungsgrad
- Erhöhung der notwendigen Antriebsleistung des Verdichters

Energetische Bewertung von Kälteprozessen

Absenkung tc: Minimaler möglicher Massendampfgehalt



Kältemittel: R290 / GWP = 3

CoolTool
AC & R technology

☒ O.K.
☐ Drucken

CoolTool
AC & R technology

Ölverträglichkeit von Kohlenwasserstoffen



R404A

Die folgende Tabelle zeigt die Daten für R404A und alternative Kältemittel.



	R404A	R448A	R449A	R454A	R454C	R455A	R290	R1270	R744
Gruppe	HFKW	HFO/ HFKW	HFO/ HFKW	HFO/ HFKW	HFO/ HFKW	HFO/ HFKW	KW	KW	CO ₂
Bestandteile	R143a/ 125/ 134a	R32/ 125/ 1234yf/ 1234ze(E)/ 134a	R32/ 125/ 1234yf/ 134a	R32/ 1234yf	R32/ 1234yf	R32/ 1234yf/ 744			
Anwendung max (°C)	0	12	12	12	12	12	12	12	20
Anwendung min (°C)	-45	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-20
Anw. 2-stufig max (°C)	-30	-25	-25	-25	-25	-25	-20	-20	-10
Anw. 2-stufig min (°C)	-70	-65	-65	-65	-65	-65	-55	-55	-50
Öl 1	POE	POE	POE	POE	POE	POE	PAO	PAO	POE
Öl 2	PVE	PVE	PVE	PVE	PVE	PVE	PAG	PAG	PAG
Öl 3							POE	POE	
Normal-Siedepunkt (°C)	-46,2	-46,1	-45,7	-47,9	-45,6	-52	-42,1	-47,6	-78,3
Normal-Taupunkt (°C)	-45,5	-39,9	-40	-42,2	-37,8	-39,2	-42,1	-47,6	-78,3
Temp.-gleit (K)	0,7	6,2	5,7	5,7	7,8	12,8	0	0	0
krit. Temp. (°C)	72	83	82	82	86	86	97	91	31
krit. Druck (bar)	37,35	45,95	45	46,3	43,2	46,5	42,5	45,6	73,8
ODP	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GWP AR4	3922	1387	1397	239	148	148	3	2	1
GWP AR6	4728	1494	1504	270	166	166	0,02		1
Sich.-klasse	A1	A1	A1	A2L	A2L	A2L	A3	A3	A1
prakt. Grenze AEL (kg/m³)	0,52	0,388	0,357	0,056	0,059	0,105	0,008	0,008	0,07

Kohlenwasserstoffe sind mit

- PAO - Polyalphaolefinöl
- PAG - Polyalkylenglykolöl
- POE - Polyolesteröl
- MO - Mineralöl

kompatibel.

=> Einsatz als Ersatzkältemittel in der Breite des Anlagenbestandes möglich.

Quelle: BITZER Kühlmaschinenbau GmbH



CoolTool Technology GmbH, D-47229 Duisburg



Förderung von stationären Kälte- und Klimaanlage

Anlehnung an ECO-Design/ErP-Richtlinie - Effizienzcheck



$$\text{SEPR // SEER} = \frac{\sum_{j=1}^n h_j \cdot P_R(T_j)}{\sum_{j=1}^n h_j \cdot \left(\frac{P_R(T_j)}{\text{EER}_{\text{bin}}(T_j)} \right)}$$

$$\text{SEPR // SEER} = \frac{\text{jährlicher Kältebedarf}}{\text{jährlicher elektr. Energiebedarf}}$$

- P_R = **gesamte** Stromaufnahme **incl. Lüfter, Pumpen**, etc.
- T_j = Temperatur am Standort Eschborn
- ErP-Richtlinie verlangt 4 Referenzpunkte
- Simulation z.B. mit **12 x 24 = 288 Referenzpunkten***
mit BAFA Energie Effizienz Tool

Förderung von stationären Kälte- und Klimaanlage

Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA)



Projekt: **Neue Kälteanlage** Beschreibung: **BAFA gefördert**

Kältemittel: **PROPAN** Kälteleistung / [kW]: **350** BaFA-Kälteleistung / [kW]: **385**

Flüssigkeitskühlsätze NK: **2021** BaFA-Betriebspunkte Flüssigkeitskühlsätze NK: **t(Sole) Austritt = -8°C, t(Luft, außen) = 35°C**

Einsatzbereich: **Gewerbekälte** Anzahl Verdichter: **1**

Temperaturbereich: **Normalkühlung NK**

Beschreibung:

Berechnung: **382166 (kWh/a)**

Betriebskosten: **84076 €/a** Emission CO₂: **173.885 t/a** SEPR/SEER: **4.31**

Einsparung Wärmerückgewinnung: **0 €/a** Typ Berechnung: **Einstufig - Standard**

Eschborn/Germany...

Lamellenfläche/Leistung Verflüssiger: **Groß** Temperaturdifferenz Verflüssiger / [K]: **7** Temperatur Verflüssigung Winterregelung: **28 °C**

Temperatur Verflüssigung / [°C]: **42** Leistung Ventilator / [kW]: **0.17 B**

Umgebungstemperatur: **Mittel** **35 °C** Regelungsart Ventilator: **Inverter**

Typ Verflüssiger: **Luftgekühlt**

Lamellenfläche/Leistung: **Mittel** Leistung Ventilator / [kW]: **0.3 B**

Lamellenabstand / [mm]: **7** Mittlere Nutztemperatur / [°C]: **Thermostatisch**

Diagramm
Städte Bearbeiten
Profil
Einstellungen
h,log p - Diagramm
Drucken
Hilfe
Abbrechen
O.K.

- Gesamtheitlicher Ansatz der Bewertung „Hohe Energieeffizienz“ durch Simulation abhängig von der Konstruktion über 288 Referenzpunkte
- Bestimmung des SEPR-Wertes einer zu fördernden Anlage
- Vorgabe eines individuellen, zu erfüllenden **MEPS**-Wertes (**M**inimum **E**fficiency **P**erformance **S**tandard) zur Bewertung
- Eingetragene Einsatzgrenzen der Komponenten müssen praktikabel sein und zu einem möglichst optimalen Betrieb der Gesamtanlage führen
- Die handwerkliche und regelungstechnische Umsetzung sollte stichpunktartig überprüft werden



CoolTool Technology GmbH, D-47229 Duisburg



Untersuchung zu brennbaren Stoffen

Finale Zusammenfassung



Dichte:	1,8 bis 2,0 kg/m³	
Zündfähig bei :	1,7 -> 10,9 Vol %	
Konzentration :	38 g/ m³ Unterer Flammpunkt (LFL)	
	243 g/ m³ Oberer Flammpunkt (HFL)	
	8 g/ m³ „Practical Limit“ (PL)	
Leckage Verhalten:	Bildet Nester	
	(zusammenhängende Schwaden)	
	Fließt eigenständig zu Senken	
	Bleibt lange explosionsfähig	
Verwendung Kälte:	Für Kältekreisläufe ungeeignet	
	Verringerte Energieeffizienz	

Flammverhalten von und Effizienzbewertung von Kohlenwasserstoffen

Grundlagen für das BAFA Förderprogramm

10/2025



Abschließende Fragen?

Vielen Dank für ihre Aufmerksamkeit.

CoolTool Technology GmbH
Kruppstr. 184
D-47229 Duisburg

www.cooltool-technology.de
info@cooltool-technology.de



CoolTool Technology GmbH, D-47229 Duisburg

