Deutsche Kälte- und Klimatagung DKV Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein

DKV Jahrestagung Magdeburg, Nov. 2022

# Risikoanalyse für Außen aufgestellte Wärmepumpen mit R290 Entwicklung einer Risikomatrix als Akzeptanzkriterium.


**Holger KÖNIG**

***ref-tech engineering***
**Lindau a. Bodensee, Germany**
Holger.Koenig@ref-tech.de

**Prof. Dr.-Ing. habil. Th. HACKENSELLNER**
**Georg JAGER**

**Glen Dimplex Deutschland GmbH, Kulmbach**

GlenDimplex DEUTSCHLAND

# Agenda

1. Einleitung, Risikoanalyse und Prozess
2. Untersuchungsinhalte und Ergebnisse
   - Phase I: Erfassung, Erstbeurteilung von risikobehafteten Ereignissen, Maßnahmen zur Risikominderung
   - Phase II: Risikobeurteilung von signifikanten Ereignissen
   - Phase III: Validierung durch Versuche
3. Risiko-Akzeptanzkriterium
4. Zusammenfassung und Ausblick

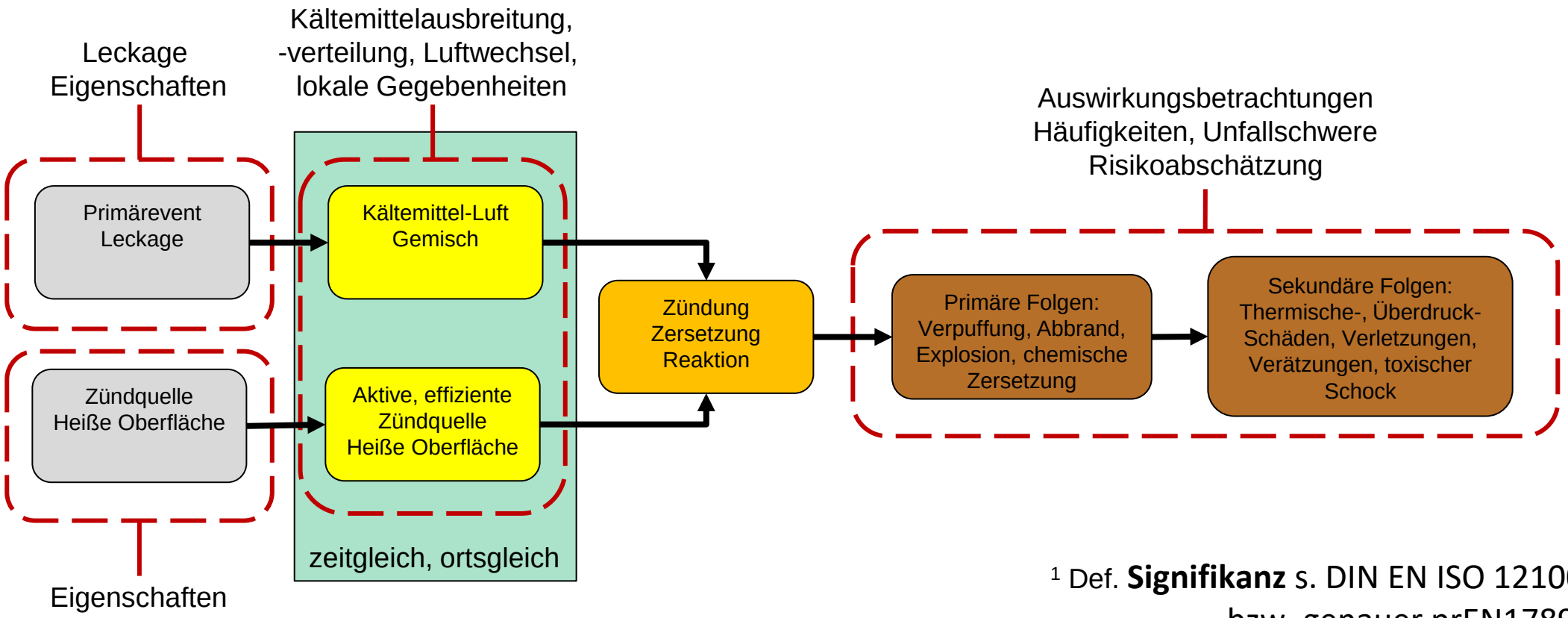
# **Begriffsklärung und Definitionen** (vgl. ISO Guide 51)

- **Sicherheit:** bezeichnet allgemein den Zustand, der für Individuen, Gemeinschaften sowie andere Lebewesen, Objekte und Systeme frei von unvertretbaren Risiken ist.
- **Risiko**: Kombination der Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Schadens und der Schwere dieses Schadens.

- **vertretbares Risiko**: Risikoniveau, das in einem gegebenen Kontext basierend auf den aktuellen Werten der Gesellschaft akzeptiert wird.
- **Risk Assessment**: verpflichtende quantitative Bewertung des Risikos.

# Risiko: Funktion der Häufigkeit und Ereignisschwere

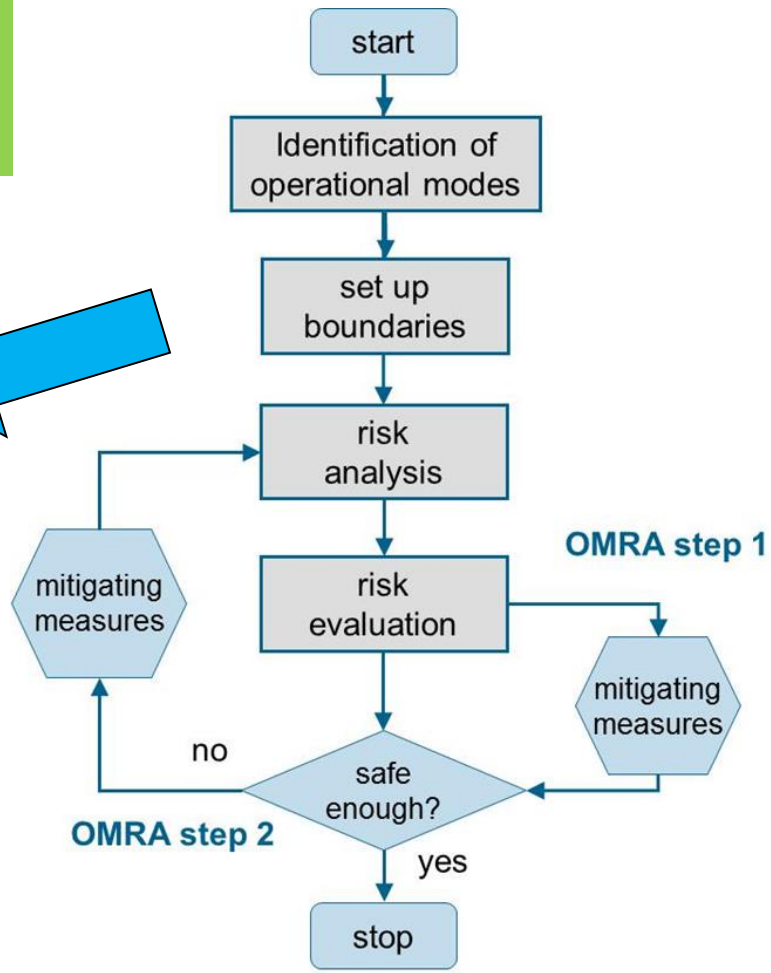
- Identifizierung von **signifikanten**[1] Gefährdungen: hier R290-Leckage
  - Zeit-, ortsgleich: Leckage, Zündquelle, brennbare Atmosphäre
  - **Inakzeptable** Unfallschwere




[1] Def. **Signifikanz** s. DIN EN ISO 12100, 3.8; bzw. genauer prEN17893, 5.3

## Randbedingungen: Kern-Know-How Leckage Ereignis

- R290 Leckage-Ereignis
  - Servicedaten
  - Leckage-Ort, Komponenten
  - Leckage-Ursachen
  - Leckage-Arten
  - Leckage-Größen, -Schätzwerte
  - Leckage-“Narrativ“ (Zeitverlauf der Massenströme)
  - Leckage-Häufigkeit
  - Kältemittelmanagement
  - Literatur, Normen




Risk Assessment work flow

- Analyse Kältemittel-Management, Nachfüllmengen (alle Typen)
- Auswertung von 27.000 Servicedaten-Sätzen (alle Typen)
  - Komponenten mit Leckagehinweisen, -häufigkeiten
- Erste Festlegung: Annahmen für Leckmassenströme und -häufigkeiten
- Für Phase II: Ermittlung Schadenhistorie von Ereignissen
  - Schliffbilder, Bruchverlauf, Zeitverlauf, Metallurgie, Verbindungstechniken, usw.
- Kontinuierliche Design-Optimierungen auf Basis der Erkenntnisse

# Agenda

1. Einleitung, Risikoanalyse und Prozess
2. **Untersuchungsinhalte und Ergebnisse**
   - Phase I: Erfassung, Erstbeurteilung von risikobehafteten Ereignissen, Maßnahmen zur Risikominderung
   - Phase II: Risikobeurteilung von signifikanten Ereignissen
   - Phase III: Validierung durch Versuche
3. Risiko-Akzeptanzkriterium
4. Zusammenfassung und Ausblick

# Übersicht

- 49 relevante Fälle betrachtet
- 15 signifikante Fälle (zu häufig, hohe Unfallschwere vermutet)
  - 8 unfallartige Ereignisse (menschl. Versagen, Stoß, Sturz, Unfall)
  - **7 unerwünschte betriebsrelevante Ereignisse**
  - Weitere Untersuchung in Einzelfallanalysen (Phase II, III)
- **77 Aktionen: Innovationen, Design Optimierungen, div. Fragestellungen zu Leckage-Ereignissen, Hinweise Betriebs- und Arbeitsanweisungen**

## Fragestellungen (Auszug)

- Prüfung der Sicherheitskonzepte (z.B. Aufstellbed., Schaltschrank)
- Ist nach Leckage eine Rückzündung in WP möglich?
- Ist Leckage durch Sturz, Stoß, Stapler-Unfall möglich?
- Auswirkungen von menschlichen Fehlern, Sabotage, Missbrauch.

## Lebenszyklus Betrieb (Auszug)

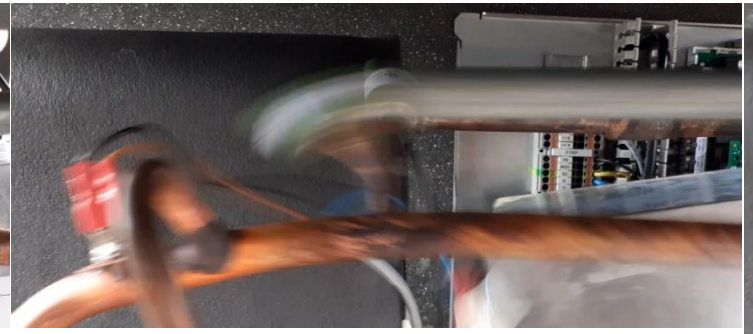
- Risiken aus vorhersehbarem Fehlbetrieb:
  - Leckage am PWT und Übertritt in Heizsystem
  - Heizkreislauf nicht ordnungsgemäß gewartet, Manipulation
  - Leckage am Außen-Verdampfer.

# Ziele

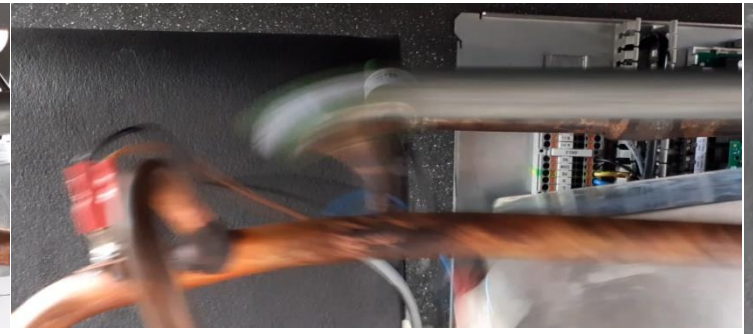
- Kompetenz-Ausbau: R290 Risikobeurteilung und –management, Entwicklung von Innovationen
  - Hausinterne Durchführung von Zündversuchen und Konzentrationsmessungen, Schaden-Simulationen

- Validierung der Risiko-Beurteilung durch Versuche
  - Einzelfälle, Sturz, Stoß, Unfälle, Sabotage, menschliche Fehler
  - Diverse Konzentrationsmessungen
  - „Worst Case“ Zündversuche

# Nachstellung Bruchleckage durch Sturz, Stoß, Unfälle, Sabotage, menschliche Fehler



# Nachstellung Bruchleckage durch Sturz, Stoß, Unfälle, Sabotage, menschliche Fehler

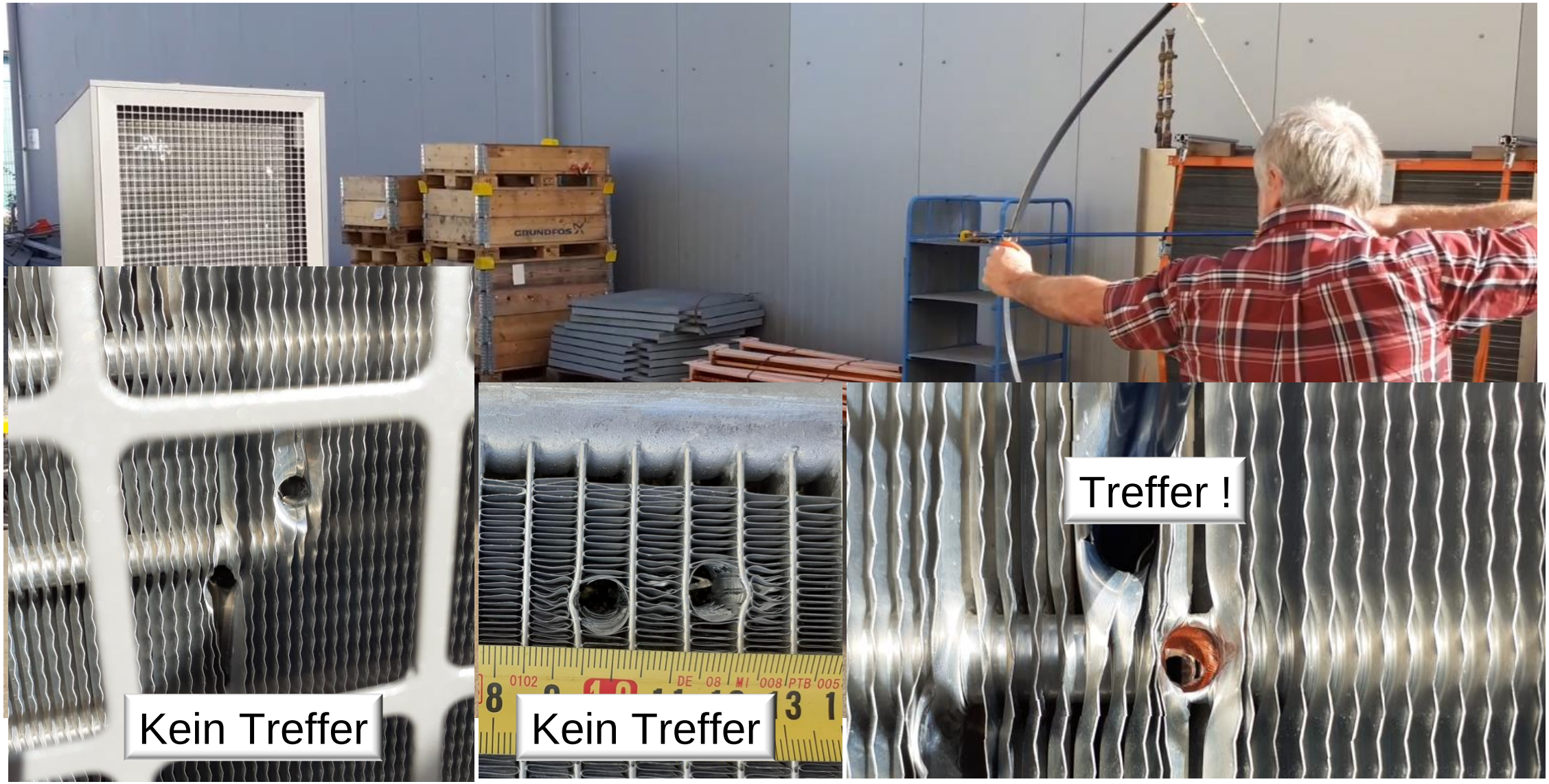


<u>Ergebnis der Versuche</u>

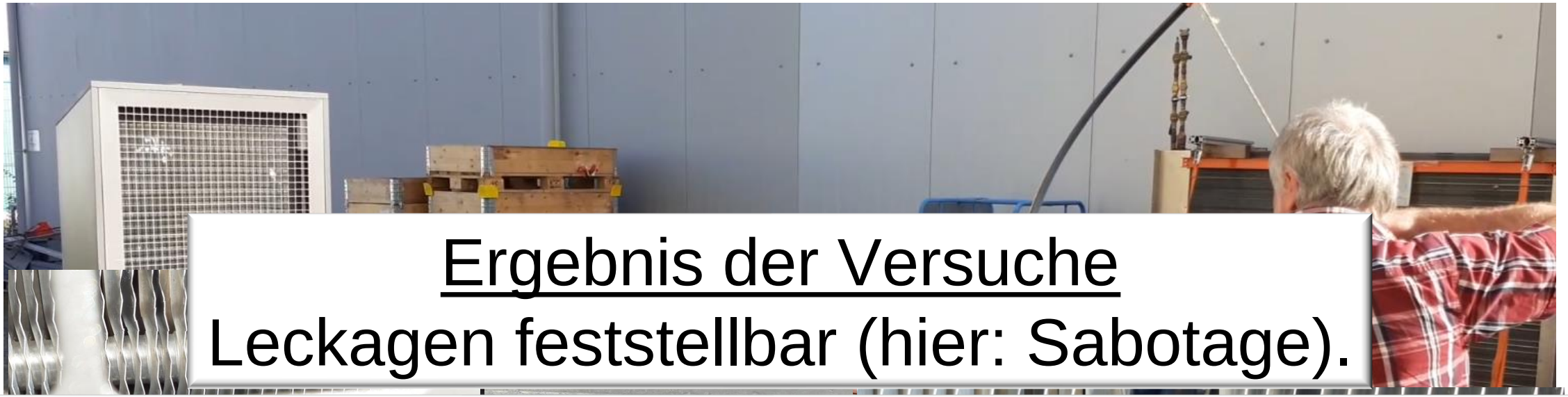
Keine Leckagen feststellbar.

Annahmen zu Bruchleckagen sind zu revidieren.

# Nachstellung Bruchleckage durch Sturz, Stoß, Unfälle, Sabotage, menschliche Fehler



## Nachstellung Bruchleckage durch Sturz, Stoß, Unfälle, Sabotage, menschliche Fehler



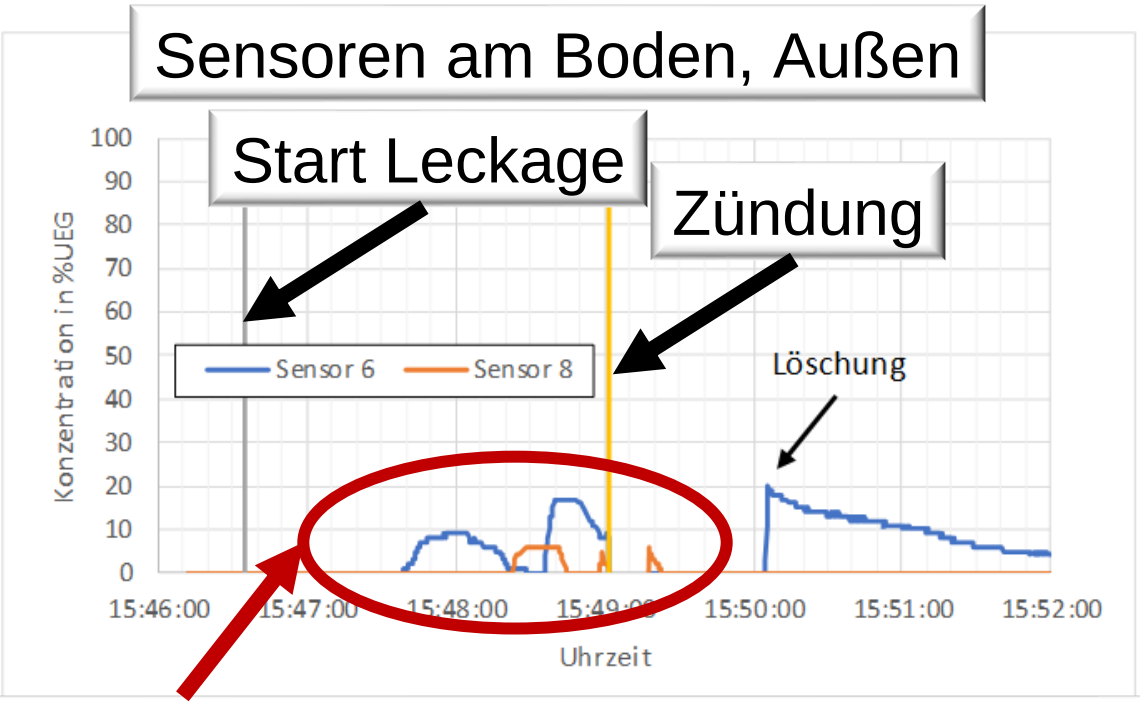
Ergebnis der Versuche
Leckagen feststellbar (hier: Sabotage).

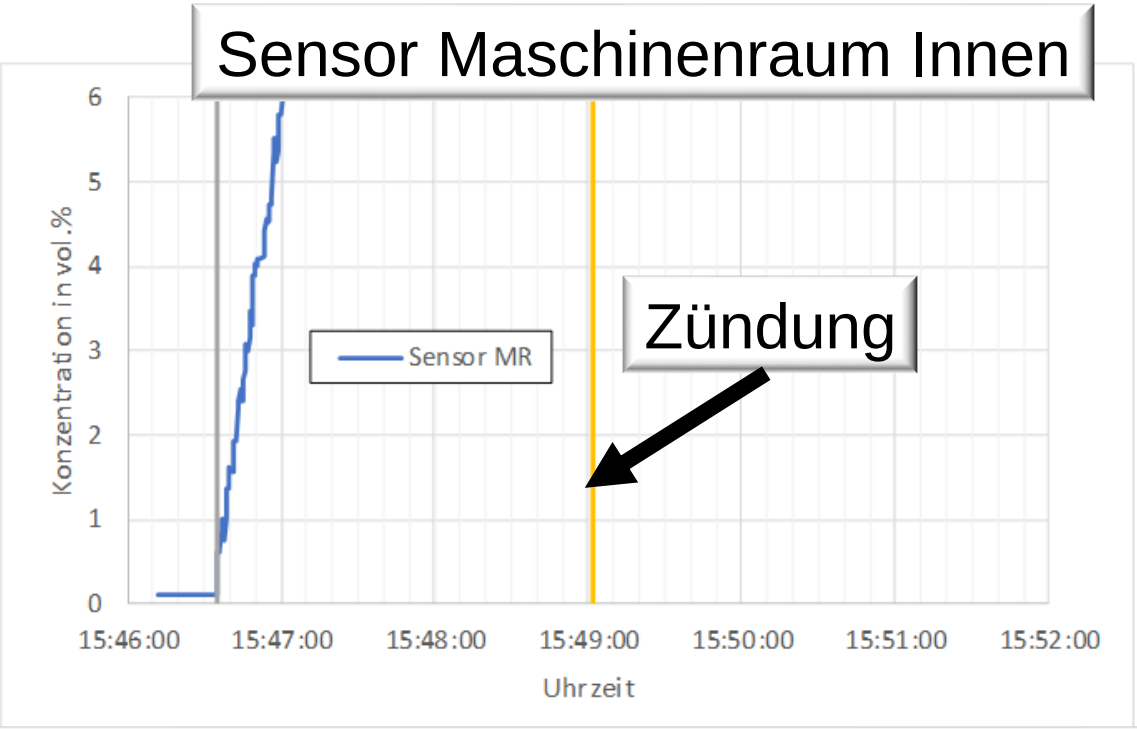
Beispielhafte Nachstellung einer Leckage nach IEC 60335-2-40, Annex FF und GG.

Die Sinnhaftigkeit einer derartigen **normativen Anforderung** ist kritisch zu hinterfragen!

## Konzentrationsmessungen u. Zünd-Versuche (Auszug), Worst Case

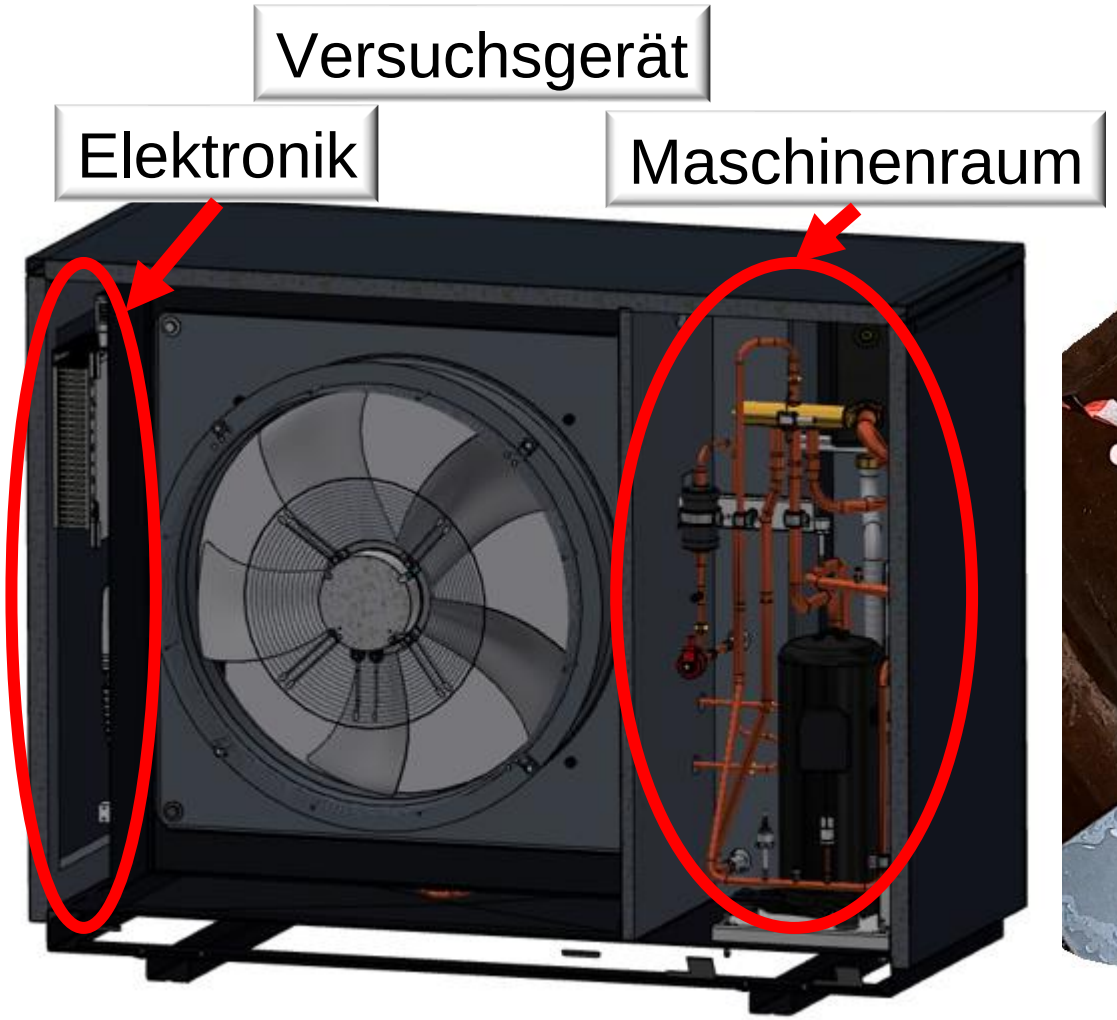
- Evaluierung: Unfallschwere als Funktion des Abstandes von Zündquellen (ZQ-Abstand 10 … 150 cm, Teelichter).
- Maschinenraum-Leckage $\dot{m}_{R290}$ = 0,2…5 g/s, ZQ am Boden




Hinweis: Sensoren in ZQ-Nähe sind u.U. „wenig verlässliche“ Sicherheitselemente.

# Maschinenraum-Leckage $\dot{m}_{R290}$ = 0,2…5 g/s, ZQ am Boden



## Maschinenraum-Leckage $\dot{m}_{R290}$ = 0,2…5 g/s, ZQ am Boden

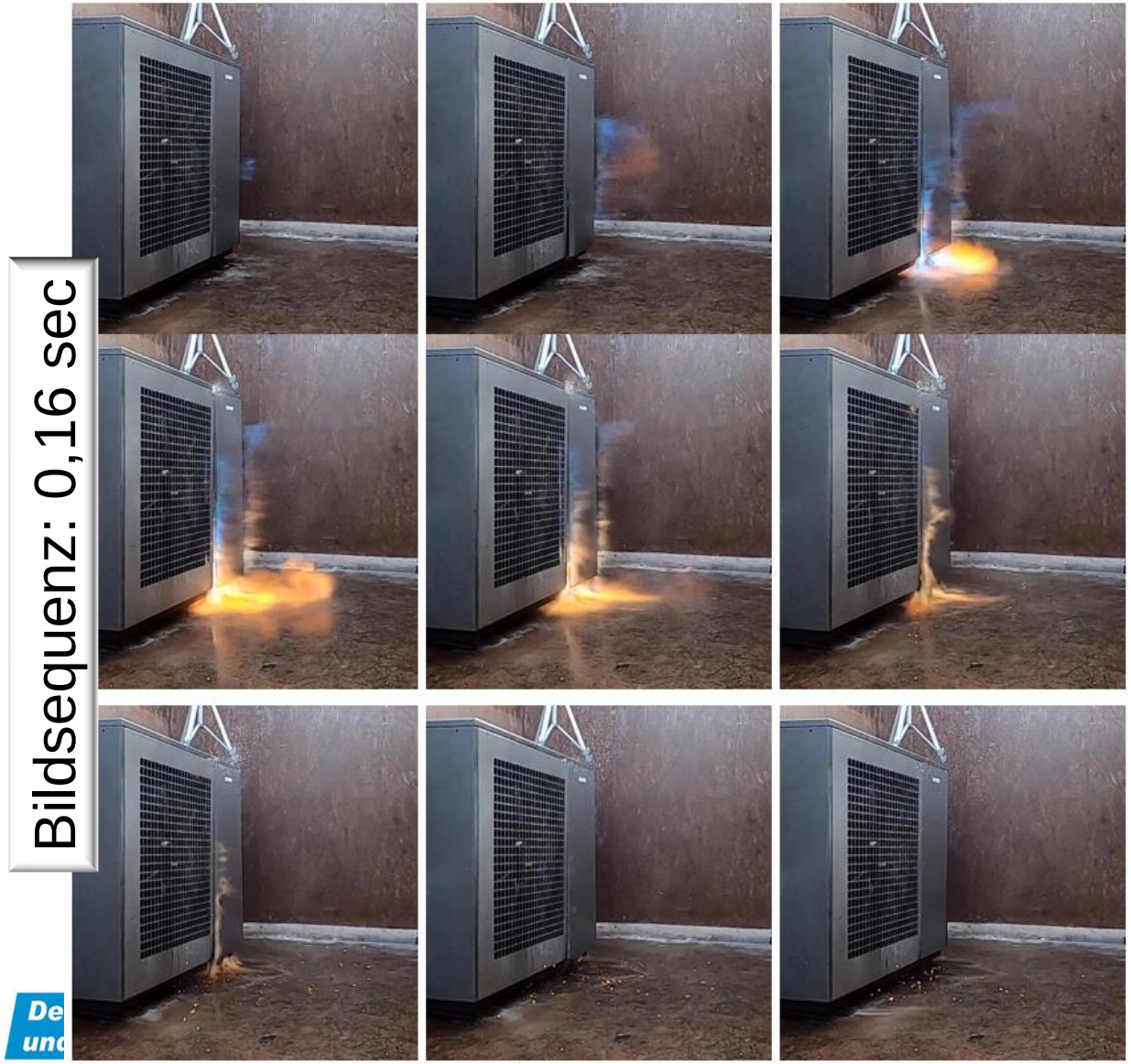
**Ergebnisse**:

- Zündung nach 150 s
- Schwergasverhalten
- Bodenabbrand, max. 5 cm Höhe, ca.1 s
- Flammenhöhe im luftoffenen Teil des Geräts ca. 50 cm, ca. 0,5 s
- Nachströmendes Gas brennt weiter ab (Bilder unten, Löschung)

- Kein Rückzünden, keine Splitterteile
- Keine Schäden am Gerät

## Worst Case Zündversuche (Auszug), stöchiometrische Mischung im Gehäuse

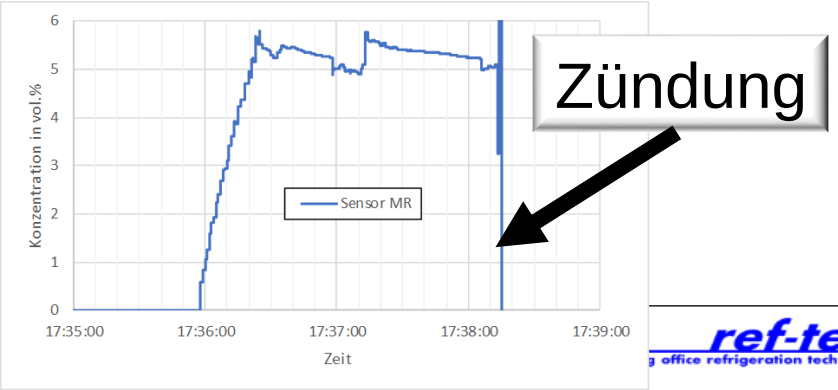
- Zündung im Maschinenraum, Konz. 4,2…5,2 Vol.-% R290 / Luft




**Ziel:** Erprobung optimiertes Gehäuse

**Ergebnisse**:

- Geringer Überdruck wird schnell abgebaut.
- Dauer des Flammenaustritts am Boden < 0,1 s, Wurfweite ca. 50 cm
- Keine Splitterteile, sehr geringe Schäden am Gerät (Dämmung)



## Ergebnisse nach Phase III: Validierung durch Versuche

- Versuchsergebnisse
  - Unfallartige, bruchartige Leckagen können nicht belastbar validiert werden
  - Unfallschwere stark überschätzt
  - Vergl. unspektakuläre Flammengrößen,-höhen, -abbrand
  - Keine Splitterteile

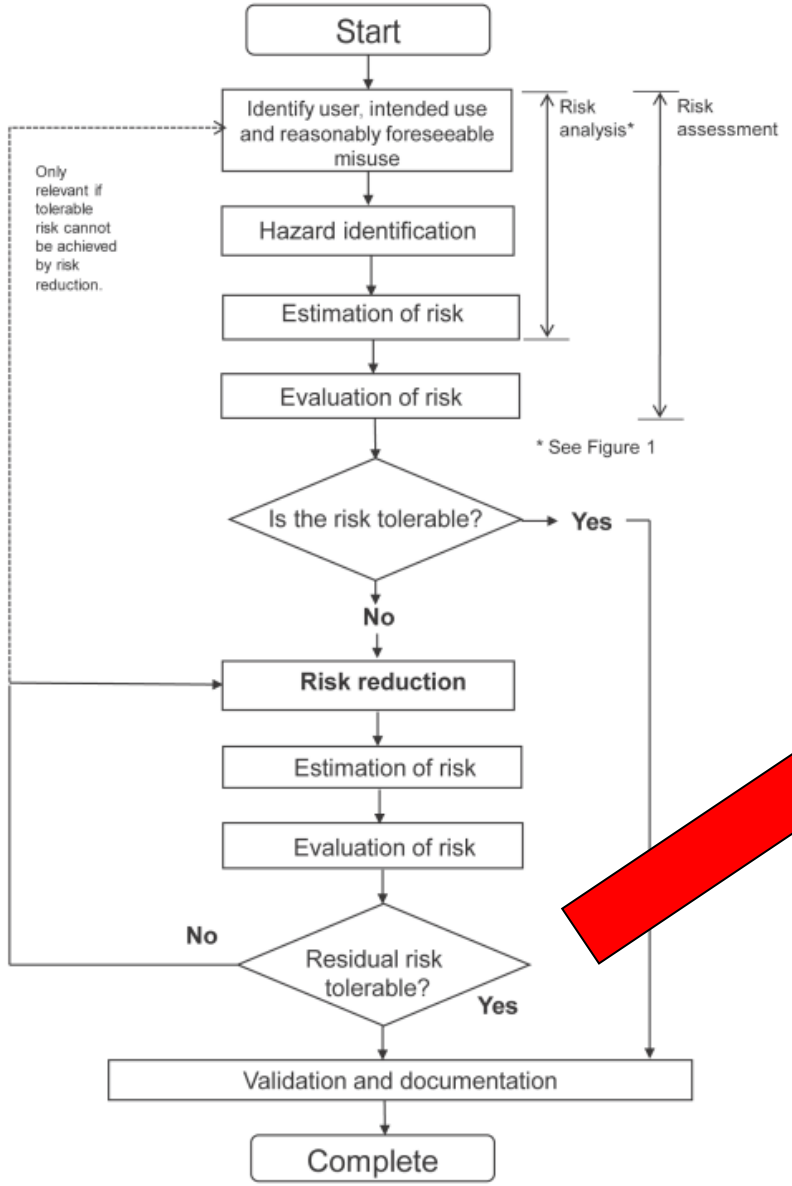
- Leckage nach IEC 60335-2-40 nicht sinnhaft für normative Anforderungen.

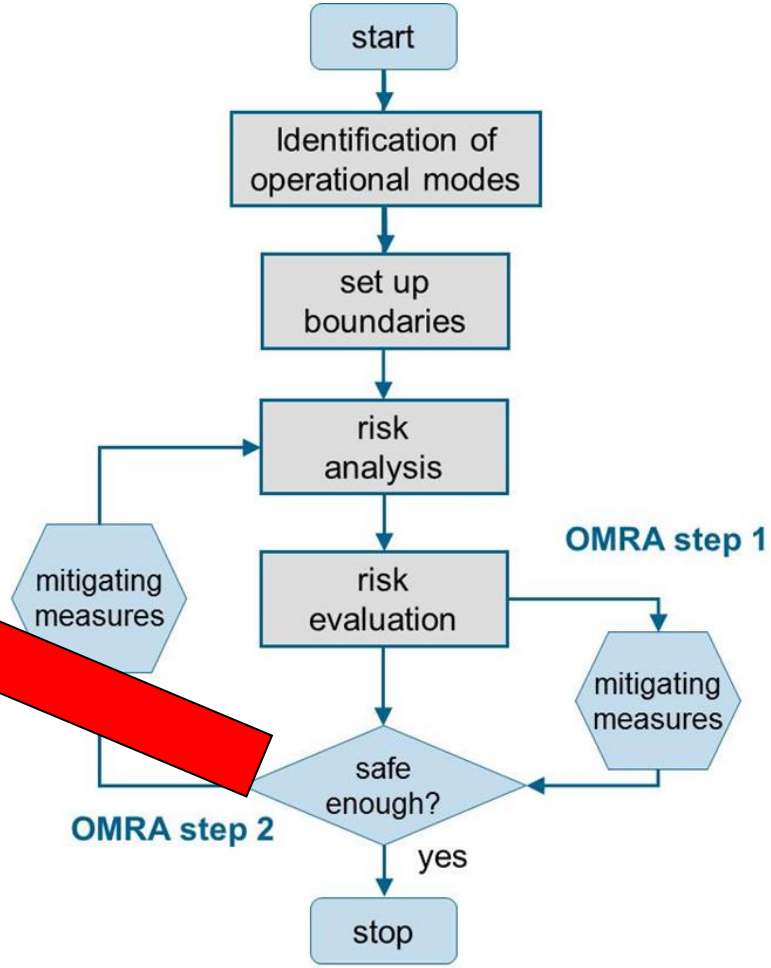
## Hauptergebnisse nach Phase I, II, III

- Revision der Aufstellbedingungen
- Kosteneffizientes Design für Schaltschrank entwickelt
- Vermeidung von Zündquellen im Maschinenraum: optional
- Ereignisse Leckage am PWT: beherrschbar
- Weiterer Aufbau von „Leckage – Know-How“
  - Analyse Schadensbilder: laufende Optimierung
  - je nach Konstruktion: Validierung der zeitlichen Verläufe von Leckage-Massenströmen.

# Risikoanalyse - Welches Risiko ist akzeptabel?

ISO Guide 51





# Auswertung: Unfallschwere vs. Häufigkeit

- bewertete Risikofälle Ph. I
- bewertete Risikofälle Ph. I-Rev
- bewertete Risikofälle Ph. II
- Ph. III: nach Versuchen

**vorgeschagenes Akzeptanzkriterium zur Evaluierung von Risiken durch Leckage von R290**

| Auftreten eines gefährlichen Ereignisses / Occurence of a hazardous event | | Häufigkeit / Anlage / Jahr | <--Wärme-pumpen | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| häufig | Frequent | $>10^{-3}$ | vernachlässigbar | vernachlässigbar | unerwünscht | untragbar | untragbar | untragbar |
| wahrscheinlich | Probable | $\leq 10^{-3}$ | vernachlässigbar | vernachlässigbar | unerwünscht | unerwünscht | untragbar | untragbar |
| gelegentlich | Occasional | $\leq 10^{-4}$ | vernachlässigbar | vernachlässigbar | tolerabel | unerwünscht | unerwünscht | untragbar |
| gering, selten | Remote, rare | $\leq 10^{-5}$ | vernachlässigbar | vernachlässigbar | vernachlässigbar | tolerabel | unerwünscht | unerwünscht |
| unwahrscheinlich | Improbable | $\leq 10^{-6}$ | vernachlässigbar | vernachlässigbar | vernachlässigbar | vernachlässigbar | tolerabel | unerwünscht |
| sehr unwahrscheinlich | very unlikely | $\leq 10^{-7}$ | vernachlässigbar | vernachlässigbar | vernachlässigbar | vernachlässigbar | vernachlässigbar | tolerabel |
| nahezu unmöglich | Almost impossible | $\leq 10^{-8}$ | 7 vernachlässigbar | vernachlässigbar | vernachlässigbar | vernachlässigbar | vernachlässigbar | vernachlässigbar |
| **HAZOP Severity Ranking Scale -->** | | | 0 | 4 | 5 | | | 8 |
| **Values and key wording under evaluation by refrigeration industry - proposal -** | | | **No damage / injury** | **Minor** (minor injuries; treatment on site) | **Marginal** (several light injuries) | **Critical** (several injuries or few severe injuries) | **Catastrophic** (several severe injuries or less than three fatalities) | **Catastrophic** (more than three fatalities or less than 30 fatalities) |
| | | | **Schadenausmaß des Ereignisses Severity of harm** | | | | | |

# Auswertung: Unfallschwere vs. Häufigkeit

- bewertete Risikofälle Ph. I
- bewertete Risikofälle Ph. I-Rev
- bewertete Risikofälle Ph. II
- Ph. III: nach Versuchen

**vorgeschagenes Akzeptanzkriterium zur Evaluierung von Risiken durch Leckage von R290**

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Häufigkeit / Anlage / Jahr | <--Wärme-pumpen | | | |
| Auftreten eines gefährlichen Ereignisses<br>Occurence of a hazardous event | | | | | | | |
| HAZOP Severity Ranking Scale --> | | | 0 | 4 | 5 | | 8 |
| Values and key wording under evaluation by refrigeration industry<br>- proposal - | | | No damage / injury | Minor (minor injuries; treatment on site) | Marginal (several light injuries) | Critical (several injuries or few severe injuries) | Catastrophic (several severe injuries or less than three fatalities) | Catastrophic (more than three fatalities or less than 30 fatalities) |
| | | | Schadenausmaß des Ereignisses<br>Severity of harm | | | | |

Alle risikobehafteten Ereignisse im gesamten Lebenszyklus, inkl. menschlichem Versagen und Servicefehler, weisen akzeptable Risiken auf !

## Zusammenfassung, Ausblick: R290 in Wärmepumpen (WP)

- Risiken mit R290 sind klein und insbesondere akzeptabel, auch unter Berücksichtigung von menschlichen Fehlern.
- Service, Ausbildung ist kontinuierlich zu verbessern.
- Einige „normative Anforderungen“ sind sehr kritisch zu hinterfragen, inklusive Grenzen von Füllmengen.
- Risikoanalysen sind vorgeschriebene und geeignete Werkzeuge zur Sicherstellung von „as safe as, or better than before“
  - Umsetzung: aufwendig, zeitintensiv
  - Innovationstreiber
- Produktentwicklung R290 in WP wird strategisch weiter umgesetzt.

GlenDimplex
DEUTSCHLAND
Thank you for your attention
ref-tech
engineering office refrigeration technologies