Risikoanalyse für Wärmepumpen mit R-290, Entwicklung einer Risikomatrix als Akzeptanzkriterium

zur Veröffentlichung bei der DKV-Kälte und Klimatagung

Holger König[1*], Prof. Dr.-Ing. habil. Th. Hackensellner[2], Georg Jager[2]

[1*] ref-tech engineering, holger.koenig@ref-tech.de, Lindau, Germany
[2] Glen Dimplex Deutschland GmbH, Kulmbach, Germany

* Korrespondenzautor

Kurzfassung

Wärmepumpen der Glen Dimplex Deutschland GmbH (GDD) mit Propan (R-290) als Kältemittel wurden bereits vor mehr als 15 Jahren in den Markt eingeführt.

Im Rahmen einer aktualisierten und verallgemeinerten Risikoanalyse wurden Risiken bei Leckagen von R-290 im Normalbetrieb, bei fehlerbehaftetem Betrieb, bei menschlichem Versagen und bei unsachgemäßer Verwendung systematisch untersucht.

Es werden die Vorgehensweise zur Ermittlung von Risiken diskutiert und die praktischen Grundlagen hierzu dargelegt. Die Erfahrungen aus dem Betrieb von und aus dem Service an Wärmepumpen mit R-290 und mit Fluorierten Kohlenwasserstoffen (HFC) als Kältemittel dienen als Basis für neue und für R-290 optimierte Wärmepumpen.

Es wird eine Risikomatrix als Akzeptanzkriterium für tolerierbare Risiken zur Anwendung auf Wärmepumpen mit R-290 vorgeschlagen. Das Akzeptanzkriterium für ein tolerierbares Risiko ermöglicht eine zielorientierte Maßnahmenentwicklung und Überprüfung der Effizienz von Sicherheitseinrichtungen im geplanten und tatsächlichen Einsatz. Damit etabliert sich die Risikoanalyse als ein wichtiges Werkzeug zur Entwicklung von Entscheidungen im Rahmen der Produktsicherheit.

Es wird gezeigt, dass Risiken beim Einsatz von R-290 in Wärmepumpen niedrig und insbesondere handhabbar sind.

Stichwörter:
Wärmepumpe, Gefährdungsbeurteilung, Risikoanalyse, Akzeptanzkriterien, tolerierbares Risiko, R-290, brennbare Kältemittel

1 Einleitung

Im Kontext der aktuellen nationalen und europäischen Gesetzgebung und den Zielen zur Primärenergieeinsparung ist die Entwicklung von nachhaltigen und langfristig akzeptablen Produkten im unternehmerischen Sinne bedeutend zur Sicherstellung des langfristigen Erfolges. Hierbei steht bei Wärmepumpen derzeit die Frage der verwendeten Kältemittel aufgrund der in Revision befindlichen F-Gase-Verordnung im Fokus. Darüber hinaus werden kritische Fragen zur kurz- und längerfristigen Wirkung von Kältemitteln in der Umwelt, d.h. in der Atmosphäre und in der lokalen und globalen Umwelt inklusive des aquatischen Systems gestellt.

Wärmepumpen (WP) werden als eine Schlüsseltechnologie zur Erreichung der Klimaziele der Europäischen Union (EU) angesehen, Stichworte zu Europäischen Themen und Verordnungen zu Kältemitteln sind: European Green

Deal[1], Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED), Energieeffizienzrichtlinie (EED) und vor allem die F-Gase-Verordnung sowie die Chemikalienrichtlinie (REACH).

In der Vergangenheit wurde der Einsatz brennbarer Kältemittel nur aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften, z.B. nach ISO 817:2014 Einstufung (Sicherheitsgruppen A1, A2L, A2, A3), als nicht sicher angesehen. Die Betrachtung und Bewertung von tatsächlich in der Praxis auftretenden Risiken wird heute zunehmend als Innovationstreiber und Chance zur Entwicklung von Alleinstellungsmerkmalen gesehen. Es wird vermehrt davon ausgegangen, dass brennbare Kältemittel genauso sicher wie nicht brennbare Kältemittel eingesetzt werden können. Hierzu sind Designoptimierung und Implementierung von Sicherheitskonzepten notwendig. Die wichtigsten Aspekte in Bezug auf die Sicherheit im Betrieb sind die sichere Handhabung des Kältemittels, Wartung und Instandhaltung.

Eine Bewertung der Eignung von zukunftssicheren Kältemitteln basiert daher zukünftig nicht ausschließlich auf der Einordnung zu chemischen Eigenschaften wie z.B. in ISO 817:2014 festgelegt, sondern sie sind in wesentlich umfassenderem Sinne durch eine Risiko- und einer Nachhaltigkeitsbewertung zu beurteilen.

1.1 Nachhaltigkeitsbewertung von Kältemitteln für Wärmepumpen

Der Begriff Nachhaltigkeit wird seit einigen Jahren inflationär verwendet. Verschiedene Produkte, Initiativen, Forschungsprogramme, wissenschaftliche Publikationen, aber auch Gesetze und Verordnungen verwenden diesen Qualifizierungsbegriff. Nachhaltigkeit und nachhaltiges Wirtschaften sind zu einem der zentralen Themen der heutigen Gesellschaft geworden; auch die Industrie und einzelne Unternehmen verpflichten sich dazu. Eine Nachhaltigkeitsbewertung basiert jedoch auf einer Vielzahl von komplexen Prozessen, unterschiedlichen Produkten und Systemen, sodass eine Messbarkeit der Nachhaltigkeit nur schwer zu erreichen ist.

Hervorzuheben ist die zunehmende Bedeutung einer Nachhaltigkeitsbewertung für Wärmepumpen, beispielsweise für den Vergleich von: Geschäftsrisiken vs. Chancen, innovative Technologieführerschaft vs. Rolle des Marktfolgers, kurzfristige Quartalsgewinnoptimierung vs. langfristige Investitionssicherheit, vorausschauende Einhaltung erwarteter Gesetze und Vorschriften vs. Verbote, energieeffizient optimierte Kälteanlagen vs. Kostenführerschaft und schließlich auch der Vergleich thermodynamischer Kreisprozesse im Falle der Verwendung des Kaltdampf-Kreisprozesses sowie die Auswahl und der Vergleich von Kältemitteln für Wärmepumpen. Für einen detaillierten Bewertungsprozess und eine Nachhaltigkeitsbewertung von kältetechnischen Produkten und Kältemitteln wird auf eine Ausarbeitung von König [1] verwiesen.

Eine Nachhaltigkeitsbewertung von Kältemitteln für Wärmepumpen führt mit den im oberen Abschnitt angeführten gesetzlichen Herausforderungen und Unsicherheiten zu einer Neubewertung der chemischen Eigenschaft der Brennbarkeit von Kältemitteln, die oft als Barriere angesehen wird, vor allem für Propan (R-290) als Kältemittel.

2 Risikoanalyse für Wärmepumpen

2.1 Grundlagen zur Risikoabschätzung

Grundsätzlich stellen Risikobeurteilung, bzw. -analysen[2] den Stand der Technik dar und werden in diversen Bereichen des alltäglichen Lebens, in der Industrie, der Medizin usw. mehr oder weniger umfassend angewendet. Engineering-Tools zur Ermittlung der Anlagensicherheit in Industrieanwendungen außerhalb der Kältetechnik sind seit Jahrzehnten etablierte Praxis.

Risiken werden im technischen Verständnis durch die technische Risikoformel nach **Abbildung 1**, als Produkt aus der Häufigkeit des Auftretens eines gefährlichen Ereignisses (= occurence of a hazardous event) und der Unfallschwere, des Schadenausmaßes eines gefährlichen Ereignisses (= severity of harm), ermittelt, definiert und in Risikoanalysen mittels verschiedener Analysewerkzeuge erfasst.

[1] Siehe z.B. https://de.wikipedia.org/wiki/European_Green_Deal
[2] Hier gleichbedeutend mit dem engl. Begriff Risk Assessment verwendet.

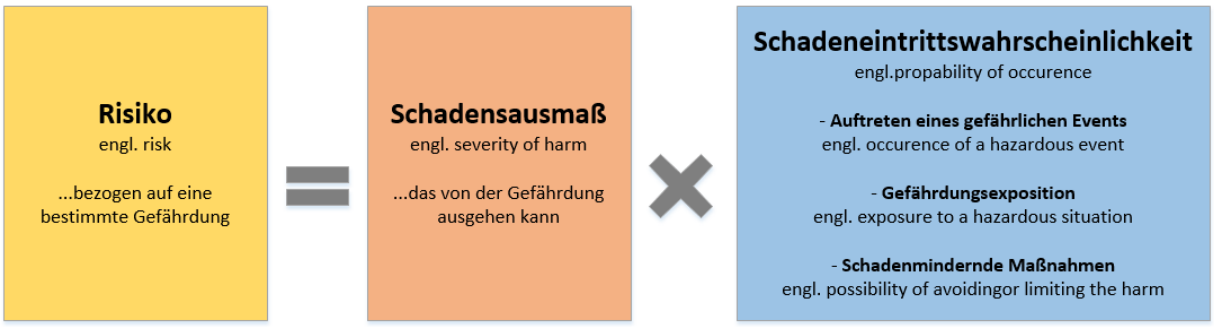

Abbildung 1: Elemente des Risikos (technische Risikoformel)

Der Risikobeurteilungsprozess kann z.B. nach EN 12100:2011 erfolgen, es sind folgende Kriterien zu untersuchen:

1. Festlegung der Einsatzgrenzen und der bestimmungsgemäßen Verwendung, hier: unter der Berücksichtigung der Eigenschaft einer dauerhaft technisch dichten WP (in Sinne der EN 1127:2019) und, daraus abgeleitet, die Anforderungen an mögliche optionale Sicherheitskonzepte.
2. Die Beurteilung und Bewertung von Risiken, hier: schleichende Leckagen, seltene Fehlfunktionen und katastrophale Fehler mit Leckagen von R-290.
3. Wurden Risiken hinreichend vermindert und sind diese akzeptabel?
    a. bei der bestimmungsgemäßen Verwendung, bei seltenen Fehlfunktionen und vorhersehbarem Missbrauch bzw. Unfällen,
    b. Risikoakzeptanz: subjektive Definition des Risikoniveaus, welches als tolerierbar angesehen wird, mit den Elementen:
        i. Werksnormen, geltende nationale oder regionale Vorschriften und relevante internationale Normen,
        ii. Richtlinien des Herstellers zur Bestimmung der Kriterien für ein tolerierbares Risiko, sowie
        iii. die Berücksichtigung von Informationen wie dem allgemein anerkannten Stand der Technik und vor allem der aktuellen Werte des tolerierbaren Risikos relevanter Interessensvertreter oder beteiligter Parteien.

Die Beantwortung dieser Fragen ist Inhalt einer vollständigen Risikobeurteilung. EN 12100:2011, Abschnitt 4, Bild 1 zeigt eine schematische Darstellung des dreistufigen iterativen Prozesses zur Risikominderung. In der EN 12100:2011, Abschnitt 4, Bild 2 sind die Pflichten des Betreibers und Eigentümers besonders hervorgehoben. Vorhandene Risiken auf Seiten des Betreibers sind, soweit vernünftigerweise möglich und bekannt, durch den Hersteller zu erfassen. Im Risikoanalyseprozess sind dafür geeignete Maßnahmen zur Risikominderung vorzusehen. Restrisiken sind an den Eigentümer bzw. an den Betreiber zu kommunizieren.

Risiken sind hierbei mittels entsprechender technischer Werkzeuge (Methodik, Normen) im relevanten Lebenszyklus zu erfassen. Zusätzlich ist zu dokumentieren, dass das Restrisiko akzeptabel ist, bzw. die Sicherheit eines Produktes im Betrieb akzeptable Risiken aufweist oder dieses Produkt, wiederum bezogen auf die Anwendung und den Betrieb des Produktes „so sicher wie zuvor“ betrieben werden kann. Der Terminus „so sicher wie zuvor“ bezieht sich hierbei auf die Risiken im gesamten Lebenszyklus eines Produktes, d.h. insbesondere auf den vorgesehenen Betrieb.
Neu entwickelte Empfehlungen zur Durchführung einer Risikoanalyse in der Kältetechnik für die Anwendung von brennbaren Kältemitteln sind:

- ISO 20854:2019; *Thermal containers - Safety standard for refrigerating systems using flammable refrigerants - Requirements for design and operation*

- prEN 17893:2022; *Thermal road vehicles - Safety Standard for temperature-controlled systems using flammable refrigerants for the transport of goods - Requirements and risk analysis process*

Allgemeine Beschreibungen und Verfahren sind:

- EN 12100:2011; *Safety of machinery - General principles for design - Risk assessment and risk reduction*
- Risikoermittlung und Risikobeurteilung nach FMEA, FMECA (IEC 60812), FTA (IEC 61025), HAZOP (IEC 61882), ETA (IEC 62502) – Methodik.

Noch umfassender und allgemeiner finden sich Risikomanagement-Verfahren in IEC 31010:2019.

2.2 Risiken bei der Verwendung von brennbaren Kältemitteln

Risiken einer Entzündung beim Einsatz von R-290 entstehen ausschließlich bei Leckagen oder Freisetzung des Kältemittels.

Wärmepumpen sind grundsätzlich als dauerhaft technisch dichte Anlagen zu betrachten und stellen hinsichtlich einer Leckage des Kältemittels bei ihrer bestimmungsgemäßen Verwendung im Normalbetrieb kein Risiko dar. Dieser Sachverhalt wird im Folgenden kurz erläutert.

Leckagen an Kälteanlagen hatten in der Vergangenheit bei Einsatz von nicht brennbaren Kältemitteln eine weniger priorisierte Rolle im gesamten relevanten Fertigungs- und Qualitätsprozess beim Anlagenbauer und beim Betreiber. Mit dem Einsatz eines brennbaren Kältemittels werden höhere Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Dichtheit aber auch an die Betriebsweise zur Vermeidung von Leckagen durch Fehlbetrieb gestellt, z.B. mangelnde Wartung des Kälteträgersystems oder Einfrieren des Plattenwärmeübertragers mit nachfolgender Leckage.
Mit einer stärkeren Beachtung der Problematik von Leckagen von brennbaren Kältemitteln ändert sich für die Wärmepumpe auch der gesamte Qualitätsprozess der Produktion, der Installation, der Ausbildung, der Logistik und des Transports, weiterhin die Betriebsweise sowie die Verschrottung.

Leckagen bei Wärmepumpen sind grundsätzlich bei ihrer bestimmungsgemäßen Verwendung[3], d.h. im vorgesehenen normalen Betrieb auszuschließen. Um Risiken durch Leckagen zu ermitteln, sind Untersuchungen zur Leckagehäufigkeit und -art erforderlich und vor allem die Ursachen für Leckagen zu ermitteln. Grundsätzlich sind hypothetische, große und unfallartige Leckagen, z.B. durch Fremdeinwirkung oder durch fehlerhafte Betriebsweise typischerweise mit hohen Schadenserwartungen behaftet. Diese sind allerdings extrem unwahrscheinlich und treten insbesondere nicht im Normalbetrieb auf.
Die bestimmungsgemäße Verwendung von Wärmepumpen setzt die Eigenschaft eines dauerhaft technisch dichten Systems voraus. Wenn diese Forderung zur Dichtheit nicht gewährleistet wäre, würden derartige kältetechnische Produkte nicht nur unverkäuflich sein, sondern würden auch gegen gesetzliche Auflagen zur Einhaltung der F-Gase-Verordnung verstoßen. Die Dichtheit von Wärmepumpen in der Praxis einzuhalten, entspricht dem Stand der Technik.
Anlagen, die im Normalbetrieb betrieben werden und die als dauerhaft technisch dicht anzusehen sind, erzeugen in ihrer unmittelbaren Umgebung keine brennbare Atmosphäre (vergleiche EN 1127-1:2019, Anhang B). Mit diesem Verständnis können Zündquellen in der unmittelbaren Umgebung einer dauerhaft technisch dichten Anlage, wenn technisch erforderlich, durchaus vorhanden sein. Auch normativ, z.B. in den einschlägigen Regelwerken zum Explosionsschutz (z.B. ATEX-Richtlinie), gibt es diesbezüglich keine Anforderungen. Hierzu wird in der Norm EN 1127-1:2019 im Anhang B beschrieben, dass bei dauerhaft technisch dichten Anlagen[4] im vorgesehenen Betrieb keine signifikanten[5] Leckagen zu erwarten sind. Dieser Sachverhalt wird durch allgemein akzeptierte Anforderungen an die Dichtheit[6] von Kälteanlagen/Wärmepumpen unterstrichen.
Nach Anwendung der EN 1127:2019 auf die Eigenschaften und Betriebsweise von Wärmepumpen kann geschlossen werden, dass im Normalbetrieb von Wärmepumpen kein Umgebungsbereich existiert, in dem vernünftigerweise mit dem Vorhandensein einer brennbaren Atmosphäre zu rechnen ist. Damit ist eine Eliminierung von Zündquellen in der unmittelbaren Umgebung nicht erforderlich. Aufstellbedingungen sollten sich deshalb vor

[3] Definition lt. DIN EN ISO 12100:2011, 3.23
[4] Gleichbedeutend mit dem Begriff Enhanced Tightness lt. EN 1127:2019, 3.2
[5] Definition und Bedeutung der **Signifikanz** im nachfolgenden Text nach DIN EN ISO 12100, 3.8 *signifikante Gefährdung*
[6] z.B.: EN ISO 14903, Refrigerating systems and heat pumps — Qualification of tightness of components and joints

allem nach den Maßgaben zur allgemeinen Gefahrenabwehr, Anforderungen an Installation und an Wartung und anderen Maßnahmen zur Vermeidung von unfallartigen Ereignissen richten, die zu Leckagen von R-290 aber auch anderen Beschädigungen führen könnten.
Anlagen, die als dauerhaft technisch dicht zu bezeichnen sind, weisen gegebenfalls schleichende Leckagen auf, die derart klein sind, dass üblicherweise keine (signifikanten) Gefährdungen auftreten und der vom Hersteller und Betreiber vorgesehene Wärmepumpenbetrieb problemlos ermöglicht wird (vergleiche auch Erläuterungen in EN 1127-1:2019, Anhang B.3). Möglicherweise auftretende Akkumulationen von schleichenden Leckagen in unterschiedlichen Situationen sollten mit in eine Risikoanalyse aufgenommen werden. Wärmepumpen weisen u.U. in der Praxis Leckagen auf, die als „seltene Fehlfunktion“[7] anzusehen sind, die aber zunächst nicht hinreichend hinsichtlich der Häufigkeit und Größe der Leckage spezifizierbar sind. Zu diesen seltenen Fehlfunktionen zählen z.B. Leckagen durch Rissbildung bei Schwingungsbeanspruchung, Korrosionsschäden, Stoß- und Schockbelastungen und Materialermüdung. „Katastrophale Fehler“[8] entsprechen der Berücksichtigung von Unfällen. Signifikante Verluste von Kältemittel bei der Wartung stellen im Sinne der Risikoanalyse vorhersehbare Fehlbedienungen oder Missbrauch dar. Leckagen bei seltenen Fehlfunktionen oder katastrophalen Fehlern, Unfällen sowie vorhersehbarem Missbrauch stellen damit unspezifizierte Risiken dar (Art und Größe sowie Häufigkeit der Leckage), die sich durch ein systematisches Vorgehen zur Ermittlung der tatsächlichen Risiken im Lebenszyklus ermitteln lassen. Im Rahmen dieser Risikoanalyse wurden hierzu umfangreiche Servicedaten analysiert (siehe Abschnitt 2.4).
Eine Freisetzung von Kältemittel kann durch eine Leckage in verschiedenen Phasen des Lebenszyklus erfolgen, z.B. in der Produktion, beim Transport, während der Lagerung und bei Logistikprozessen, im Betrieb, bei der Reparatur und im Service sowie bei der Ausserbetriebsetzung, Wiederverwertung und Entsorgung.

Eine hypothetische Annahme einer Leckage im Sinne der Risikobeurteilung erfolgt in Form verschiedener zu unterscheidender Leckagearten und Leckraten:

1. Schleichende Leckage: sehr kleine Leckagen, die im Normalbetrieb auftreten und nicht zu einem Betriebsausfall im Zeitraum von kleiner 2 Jahren führen (z. B. Korrosionsleckage) aber, prinzipiell, durch Akkumulation über längere Zeiträume Risiken entstehen lassen können.
2. Kleine Leckage: undichte Verschraubung, Lötstelle, fehlende Verschlusskappe eines Schraderventils, beginnender Schwingungsriss.
3. Große Leckage: z. B. fehlerhafte Verschraubung, ausgeprägter Schwingungsriss.
4. Unfall, Rohrbruch: unfallartige Freisetzung bei z.B. Transportunfall, Beschädigung, Unfall, Brand, externe Ereignisse.

Grundsätzlich ist die Entstehung einer Leckage ein zeitabhängiger Vorgang (Kältemittelstoffdaten, Systemdruck, thermische Trägheit des Systems, Leckageart und Leckagegröße). Beispielhaft kann ein Schwingungsbruch, der bei der Produktentwicklung nicht identifiziert wurde, angeführt werden. Bei dieser Versagensart, die üblicherweise im Vorfeld durch Schwingungsprüfungen eliminiert wird, entsteht durch eine mechanische Überlastung auf Dauer ein Rissansatz, der zunächst klein ist und damit eine kleine Leckrate aufweist. Im weiteren Bruch-Zeit-Verlauf vergrößert sich der Rissansatz und ggf. der Leckagemassenstrom. Schwingungsrisse weisen eine vergleichsweise längere Schadenhistorie auf, sodass u.U. bereits eine gewisse Kältemittelmenge ausgetreten ist und diese nicht auf die spätere Schadensbildgeometrie bezogen werden kann. Diese Versagensart tritt beispielweise bei Spannungsriss-Korrosion an NH_3-Anlagen auf, die oft aufgrund des hohen Warnfaktors „Geruch“ frühzeitig und oft deutlich vor dem Eintritt eines Gewaltbruchs erkannt wird.
In **Abbildung 2** (vergl. [2]) ist ein Ereignisbaum mit den Bedingungen für das Eintreten eines risikobehafteten Ereignisses skizziert. Hierbei sind die voneinander unabhängigen Wahrscheinlichkeiten der Ereignisse „Leckage“, „aktive, effiziente Zündquelle“ und das Vorhandensein einer „brennbaren Atmosphäre“ Bedingungen für das Eintreten des risikobehafteten Ereignisses „Zündung“. Die Gefährdungsbeurteilung zur Bewertung des Ereignisses „Zündung“ bezieht die „Auswirkungsbetrachtungen“ und die Unfallschwere ein.

[7] Definition IEC 60079-10-1:2015, 3.7.3 oder prEN 17893, 3.10.1
[8] Definition IEC 60079-10-1:2015, 3.7.4 oder prEN 17893, 3.10.2

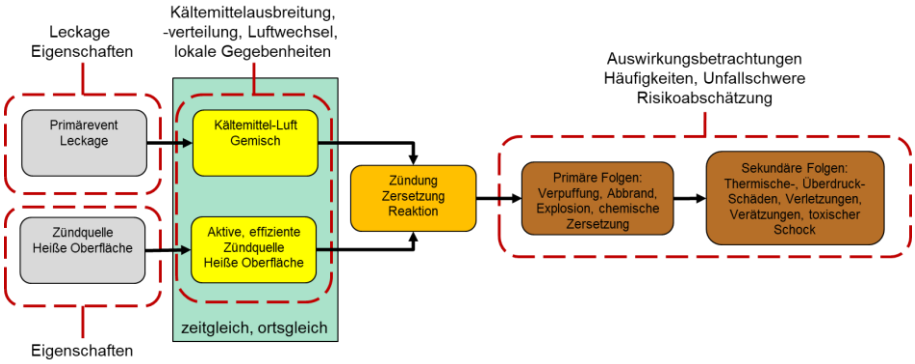

Abbildung 2: Ereignisbaum mit Darstellung der unabhängigen Ereignisse zur Identifizierung von Risiken bei Leckagen

Zur Untersuchung von Risiken von R-290 in Wärmepumpen wurden die Prinzipien der o.g. Normen weiterentwickelt und in Form angepasster Methodiken verwendet. Risiken wurden mit Experten von GDD im gesamten Lebenszyklus der Wärmepumpen erfasst, d.h. in der Entwicklung, in der Produktion, in der Logistik, im Betrieb, beim Service, beim Recycling und bei der Verschrottung. Die entwickelten Methoden sind durch fachübergreifende Einbindung der Experten geeignet, schnell und weitgehend umfassend risikobehaftete Ereignisse zu erfassen. Eine systematische Ermittlung und Dokumentation von Risiken im Betrieb wurden damit ermöglicht.

2.3 Literaturbasis für Leckageraten und Leckagehäufigkeiten

Häufigkeiten für Leckagen in Abhängigkeit von ihrer Art und Größe wurden aus der bekannten Literatur der Kältetechnik und für vergleichbare Anwendungen recherchiert und zur Risikobeurteilung verwendet. Hierbei ist festzuhalten, dass Literaturangaben nicht direkt auf die Anwendung bei Wärmepumpen übertragbar sind und einer Überprüfung der Gültigkeit im Rahmen der Risikoanalyse bedürfen. Auf eine detaillierte Darlegung der Fachliteratur wird in dem vorliegenden Fachartikel verzichtet (siehe z.B. in [3, 7]).
Als Leckagemassenströme für die ersten Betrachtungen in der Risikoanalyse wurden nachfolgende Annahmen für Leckagen, je nach Ereignis oder Versagensart in Anlehnung an ISO 20854:2019, verwendet (peak massflow, R-290 // Häufigkeit (Englisch Occurence „O“):

- Spontane unfallartige Leckage (nicht Ereignisgesteuert): 10-100 g/s // O = < 1 x 10^{-6}
- Spontane große Leckagen: 0,2 … 1 … 10 g/s // O = < 1 x 10^{-5}
- Spontane kleine Leckage: 1 x 10^{-4} … 0,2 g/s // O = < 1 x 10^{-4}
- Schleichende Leckage: <1 x 10^{-4} g/s // O = 1 (immer anzunehmen).

In den nachfolgenden Phasen der Risikoanalyse konnten diese Werte durch eigene Werte aus Analysen ersetzt werden.

2.4 Servicedaten und Qualitätssicherung

Deutlich belastbarer als Literaturangaben sind die von GDD verfügbaren Service-Datensätze, Reparaturangaben (d.h. Protokolle aus Serviceeinsätzen) und Feldrückläufern. Diese Informationen stellen das Kern-Know-How für die Risikoanalyse dar. Es wurden ca. 27.000 Service-Datensätze hinsichtlich Leckageorten und Leckagehäufigkeiten bei Wärmepumpen analysiert und auf die jeweiligen Komponenten und Schadensursachen bezogen. Die Daten aus den Serviceberichten variieren neben diversen anderen Parametern nach Leistungsklasse und wurden insbesondere auch nicht auf die bei GDD produzierten R-290 Wärmepumpen allein bezogen, sondern auch auf Ereignisse, bei denen andere Kältemittel verwendet worden sind.
Es wurden Daten von ausgelieferten und in Betrieb befindlichen Wärmepumpen von GDD über den Zeitraum 2014-2019 mit Heizleistungen von 2 bis 200 kW hinsichtlich der Leckagehäufigkeit untersucht. Leckageorte wurden auf 24 Komponenten oder Rohrleitungsverbindungen aufgeteilt und für 7 Leistungsklassen differenziert ausgewertet. Zusammengefasst wurden für die Einzelkomponenten des Kältemittelkreislaufs gemittelte Leckage Häufigkeiten (Häufigkeit von Leckagen an 24 Komponenten je gefertigter Wärmepumpe im Zeitraum 2014-2019) im Bereich von 1 x 10^{-3} bis 1 x 10^{-5} ermittelt. Diese Häufigkeiten weisen prinzipiell eine gute Übereinstimmung mit anderen Literaturdaten auf, vergl. [3, 7].

Aufgrund der damit zusammenhängenden Unsicherheit wurden die für die Risikoanalyse ermittelten Häufigkeiten nachfolgend aus mehreren Informationsquellen ermittelt, insbesondere aber auf Basis der Angaben der Experten. Diese Angaben wurden in den nachfolgenden Einzelfall-Risikoanalysen revidiert und präzisiert. Die gewonnen Daten zu Leckagen stellen einen belastbaren und signifikanten Vertrauensbereich für die Einschätzung der Leckagehäufigkeiten und Leckagearten dar. Für die Anwendung von R-290 in Wärmepumpen stellen diese präzisen Angaben damit eine deutlich über den veröffentlichten Wissensstand hinausgehende Grundlage für die Risikoanalyse dar. Insbesondere zeigen diese Daten aber auch, dass Annahmen für Leckraten aus einschlägigen Normen (z.B. IEC 60335-2-40:2018), die noch darüber hinaus zu normativen Anforderungen verwendet werden sollen und dieses Leckageereignis quasi „immer“ auftreten können soll, jeglicher belastbarer Grundlage entbehren und damit auch aufgrund der Verfügbarkeit von tatsächlichen Daten verworfen wurden. Dennoch sind derartige unfallartige Leckagen als hypothetische Annahmen mit in die Risikoanalyse aufgenommen worden (siehe Abschnitt 2.3).

2.5 Design-Optimierungen

Im Rahmen von Designoptimierungen der R-290-Wärmepumpen wurden die aus den Servicedaten ermittelten Leckageorte hinsichtlich des Verbesserungspotenzials näher untersucht. Acht potenziell mit Leckagen behaftete Komponenten wurden im R-290-Design eliminiert oder modifiziert, weiterhin wurden die tatsächlich auftretenden Schäden näher hinsichtlich der zu erwartenden Leckraten erfasst. Hierzu wurden sowohl Bruch-Zeit-Verläufe als auch Schliffanalysen von Schadensbildern als Basis verwendet, um Leckraten abschätzen zu können. Es ergaben sich nach Designüberarbeitung und Anpassung diverser Komponenten und Regelalgorithmen revidierte Annahmen für Leckagemassenströme und -häufigkeiten. Die revidierten Häufigkeiten lagen hierbei 1-2 Zehnerpotenzen unter den Analyseergebnissen aus den Serviceberichten, bzw. den Literaturangaben.

Neben diesen noch immer hypothetischen Annahmen, wurden die tatsächlich zu erwartenden Leckraten in einer weiteren Revision vor allem für den vorgesehenen Betrieb und die optimierten Komponenten näher analysiert. Hierbei ergaben sich zusammenfassend maximal zu erwartende Leckraten an Komponenten von kleiner 0,1 g/s.

2.6 Risikoanalyse – Prozess

Der Prozess der Abwicklung einer Risikoanalyse stellt in seinen verschiedenen Phasen ein Innovationswerkzeug dar (siehe auch [4]). Der von Fa. ref-tech hierzu entwickelte Prozess und Workflow hat sich in mehr als 10 Jahren in verschiedenen Ausprägungen bei unterschiedlichsten internationalen und nationalen Entwicklungsprojekten als flexibel und zielorientiert herausgestellt. Insbesondere bei der Untersuchung von Risiken beim Einsatz von R-290 in der Bahnklimatisierung (siehe DKV Tagungsband 2019, [2]) und den nachfolgenden Risikomanagementprozessen für Eisenbahnsicherheit, vor allem aber bei der Umsetzung und Zulassung von R-290-Klimaanlagen für den Bahnverkehr [5, 6] konnte die Eignung dieser Vorgehensweise verifiziert werden.
Gemeinsam mit dem Entwicklungsteam und dem Management von GDD wurde der Arbeitsprozess zur Analyse von Risiken für außen aufgestellte Wärmepumpen in drei Phasen aufgeteilt:

- Phase I: Schnelle und übersichtliche Ermittlung von risikobehafteten Ereignissen im Lebenszyklus,
- Phase II: Einzelfallrisikoanalyse zu signifikanten Gefährdungen,
- Phase III: Validierung durch Versuche in Form von Konzentrationsmessungen nach simulierten Leckagen und Zündversuchen.

In Phase I wurden 49 relevante Fälle im Lebenszyklus betrachtet. Hierbei wurden 15 als signifikante Gefährdung beurteilt, d.h. traten zu häufig auf oder mit einer vermuteten hohen Unfallschwere. Davon waren 8 unfallartige Ereignisse, die durch menschliches Versagen, Stoß, Sturz oder Unfall verursacht wurden oder damit im Zusammenhang standen. Weiterhin wurden 7 unerwünschte betriebsrelevante signifikante Ereignisse identifiziert, die in fehlerhaften, aber erwartbaren Betriebssituationen auftreten können. Diese 15 Fälle mit signifikanter Gefährdung wurden in Einzelfallrisikoanalysen (Phase II) und durch Versuche (Phase III) abschließend untersucht und beurteilt. Als weitere wesentliche Ergebnisse wurden folgende Arbeitspakete festgelegt: Entwicklung risikomindernde Maßnahmen und Innovationen, Design Optimierungen, Fragestellungen zu Leckageereignissen, Hinweise für Betriebs- und Arbeitsanweisungen.

3 Versuche

Es wurden Versuche mit dem Ziel durchgeführt, die Annahmen und Ergebnisse der Risikoanalyse zu validieren und die Unfallschwere erfahrungsbasiert beurteilen zu können. Die Versuche sollten auf den noch immer konservativen, aber eher realistischen validierten Leckraten basieren.
Durch weitere Versuche sollten auch die Forderungen von Normen kritisch geprüft werden, ob spontane und ohne begründeten betrieblich bedingten Zusammenhang auftretende unfallartige Bruchleckagen bei Wärmepumpen gerechtfertigter Weise anzunehmen sind. Die Norm IEC 60335-2-40:2018 schlägt eine nicht näher begründete Leckage vor, bei der die gesamte Kältemittelfüllmenge in 4 Minuten austritt. Es werden weder die Ursachen begründet, noch die Häufigkeiten einer derartigen Leckage dargelegt. Es wird hierbei nicht berücksichtigt, dass bei signifikanten Leckagen ein transienter Zusammenhang der Leckrate mit der Dauer der Ausströmung besteht, die Konzentrationen in einem definierten Umfeld der Wärmepumpe mit entsprechender Strömungssituation zu berücksichtigen sind (siehe auch IEC 60079 - Normenserie) und zudem ein Anteil von ca. 20 % der Kältemittelfüllmenge im System verbleibt. Es wurden daher im Rahmen der durchgeführten Risikoanalyse auch Versuche durchgeführt, um die in der IEC60335-2-40 vorgeschlagenen Leckraten nachzuvollziehen. Aus anderen Versuchen [7] ist allerdings bekannt, dass derartige große Leckraten versuchstechnisch nicht einfach reproduzierbar sind. Sowohl aus den ausgewerteten Serviceberichten von GDD als auch aus den nachfolgenden Risikobetrachtungen konnten keine betrieblichen Zusammenhänge ermittelt werden, die zu derartigen Leckageraten führen. Es wurden daher auch Versuche zu Leckagen durchgeführt, die Betriebsfehler, vorhersehbares unsachgemäßes Handeln oder menschliches Fehlverhalten voraussetzen oder die auf Sabotage basieren.

3.1 Versuchsobjekte und Versuchsdurchführung

Die **Abbildung 3** zeigt die im Rahmen der Risikoanalyse untersuchten Versuchs-Wärmepumpen für die Außenaufstellung.

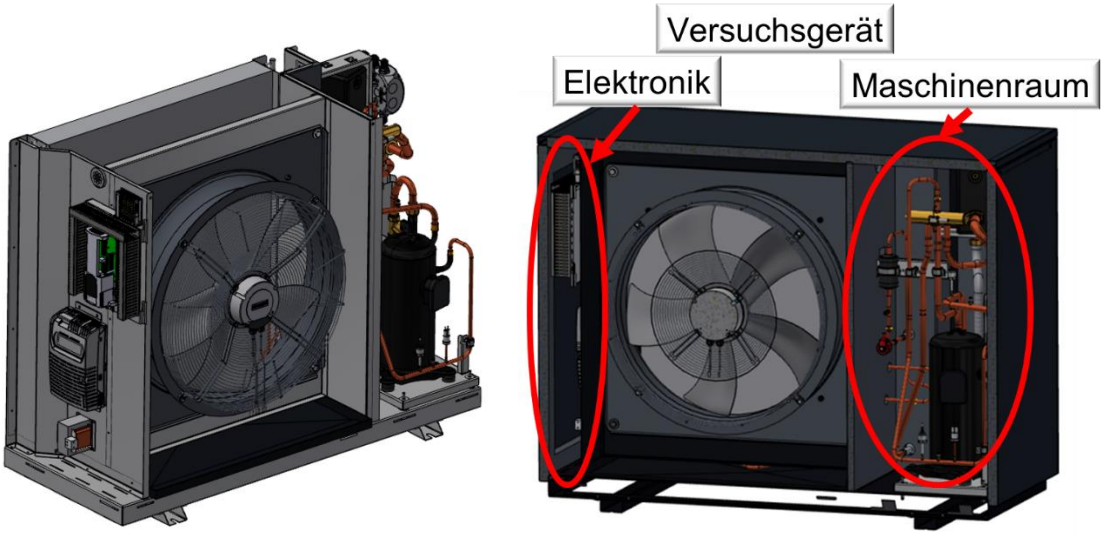

Abbildung 3: GDD Versuchs-Wärmepumpe für die Außenaufstellung, links: aufgeschnitten, ohne Gehäuse, rechts: Gerät mit Verkleidungsblechen

Es wurden mit den in der **Abbildung 3** dargestellten Versuchsgeräten Konzentrationsversuche mit Leckagen an verschiedenen Komponenten mit Leckagemassenströmen von 0,2 bis 5 g/s im Labor durchgeführt. Auf der Basis der Ergebnisse dieser Versuche wurden nachfolgend Konzentrationsmessungen und Zündversuche im Außenbereich geplant und durchgeführt. Messungen und Untersuchungen im Außenbereich sind speziell zu planen und hinsichtlich der Umwelteinflüsse besonders zu validieren, d.h. vor allem der Windeinfluss ist zu beachten. Hierzu wurden Grenzwerte aus Normen der IEC 60079-Serie für erwartbare Außenlufteinflüsse herangezogen. Die Aufstellung der Wärmepumpe bei den Versuchen wurde so gewählt, dass eine Worst Case Situation realisiert werden konnte. Beim Aufbau wurde der Windeinfluss eliminiert, so dass bei den Messungen die Zielvorgaben eingehalten werden konnten.

3.2 Ergebnisse der Versuche zur Erzeugung von unfallartigen Leckagen

Es wurden Untersuchungen bei GDD auf dem Werksgelände durchgeführt, die zum Ziel hatten, die in der IEC 60335-2-40 vorgeschlagenen Leckagen zu reproduzieren. Derartige Leckagen treten bei Wärmepumpen, die von GDD gefertigt wurden, nicht im Normalbetrieb auf. Daher wurden Versuche durchgeführt, die zeigen sollen, wie groß Leckageöffnungen und der Leckagemassenstrom sinnvollerweise anzunehmen sind, wenn schwerwiegende Betriebsfehler oder menschliches Fehlverhalten betrachtet werden. Es wurden Stoßversuche, Schlagversuche und sabotageartige Versuche durchgeführt (siehe **Abbildung 4**).

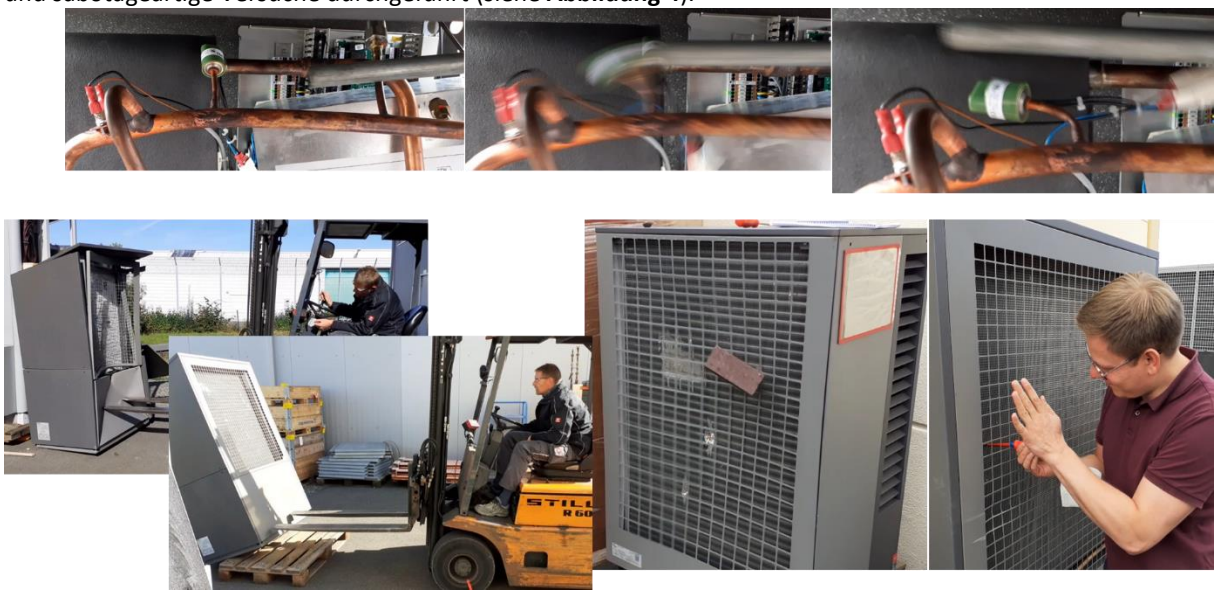

Abbildung 4: Untersuchung zur Herbeiführung von Leckagen; obere Bildfolge: Tragrohrversuche, unten links: Staplerunfälle, unten Mitte, rechts: Steinwürfe und Nachstellung einer mechanischen Enteisung eines Verdampfers.

Die Versuchsobjekte wurden nachfolgend jeweils einer Dichtheitsprüfung unterzogen. In keinem Fall konnten hierbei Leckagen festgestellt werden. Die damit zusammenhängenden Annahmen aus der vorgängigen Risikoanalyse Phase I und II für derartige risikobehaftete Ereignisse konnten damit entsprechend revidiert werden.

3.3 Ergebnisse von Zündversuchen

Es wurden Zündversuche nach den Betrachtungen in Abschnitt 3.1 mit den in der **Abbildung 3** dargestellten Versuchs-Wärmepumpen mit definierten Leckagen im sogenannten Maschinenraum der Wärmepumpe mit Massenströmen von 0,2 bis 5 g/s durchgeführt. Untersucht wurden vor allem die Auswirkungen von Zündereignissen bei verschiedenen Abständen der Zündquellen in Eckaufstellung um die Wärmepumpe. Weiterhin wurden die Auswirkungen von Worst-Case Zündereignissen mit stöchiometrischer R-290/Luft-Konzentration im Maschinenraum (siehe **Abbildung 3**) untersucht. Hierzu wurde im Maschinenraum ein steuerbarer Zündmechanismus eingebaut.

Abbildung 5 zeigt im linken Bild den Zeitverlauf der Konzentrationen im Außenbereich am Boden und im rechten Bild für den Maschinenraum.

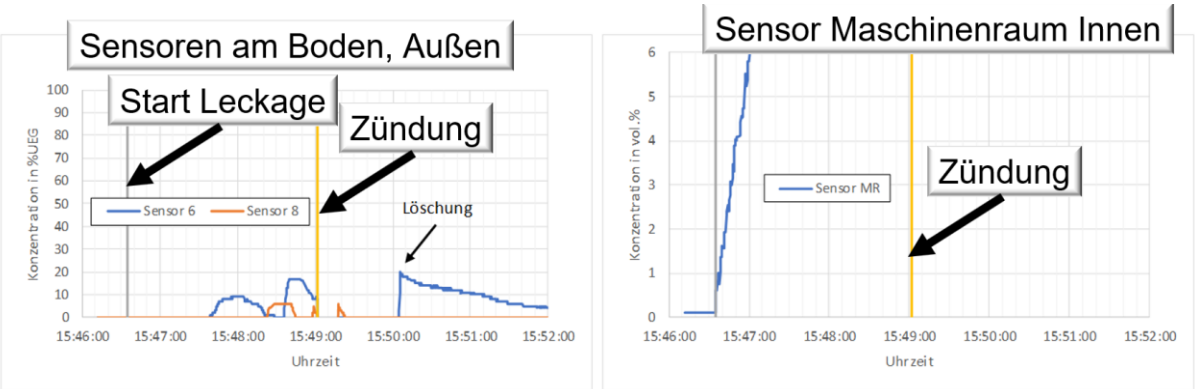

Abbildung 5: Beispiel für Konzentrationsmessung zu Zündversuchen, links Zeitverlauf der gemessenen Konzentrationen außen und rechts im Maschinenraum

Die Zündquellen (hier: 7 Teelichter) wurden in einem definierten Abstand von der Wärmepumpe aufgestellt. Die Kältemittelleckage wurde mittels einer hinsichtlich des Massenstroms kalibrierten Einrichtung in den Maschinenraum der Wärmepumpe eingebracht. Nach Flutung des Maschinenraumes trat R-290 durch Öffnungen nach außen mit teilweise ausgeprägtem Schwergasverhalten aus und wurde an einer der Zündquellen vor dem Gerät gezündet. Nach den Versuchen wurde jeweils ein Löscheinsatz durchgeführt, um die gegebenfalls noch vorhandenen Flammen, außen an den Gehäuseschlitzen, zu eliminieren. Aus den Konzentrationsverläufen außen wird deutlich, dass eine sehr inhomogene Verteilung vorliegt. Dieser Sachverhalt verdeutlicht, dass der Einsatz von Sensoren zur Messung der Konzentration zur Vermeidung einer brennbaren Atmosphäre als Sicherheitsmaßnahme eine sehr anspruchsvolle Auslegung erfordert.

Abbildung 6 zeigt links eine Bildfolge des Zündereignisses, welches zum Konzentrationsverlauf in **Abbildung 5** gehört. Die Zündung erfolgt vor dem Gerät, im zweiten Bild ist der Bodenabbrand zu erkennen, nachfolgend steigen Flammen im Gerät mit ca. 50 cm Höhe im lufttechnischen Teil und in unmittelbarer Umgebung des Gerätes auf, die sich nach dem gesamten Zeitraum von ca. 1,6 Sekunden auf eine kleine Flamme reduzieren, die aus dem Maschinenraum gespeist wird. Aus der Abbildung wird vor allem deutlich, dass mit sehr geringen Schäden und Unfallschweren zu rechnen ist, wenn ein solches Ereignis eintritt. Ein weiteres Experiment wurde mit annähernd stöchiometrischer Mischung im Maschinenraum durchgeführt. In der **Abbildung 6** ist rechts eine Bildfolge von 9 Bildern dargestellt, die einen Gesamtzeitraum von ca. 0,16 s darstellen.

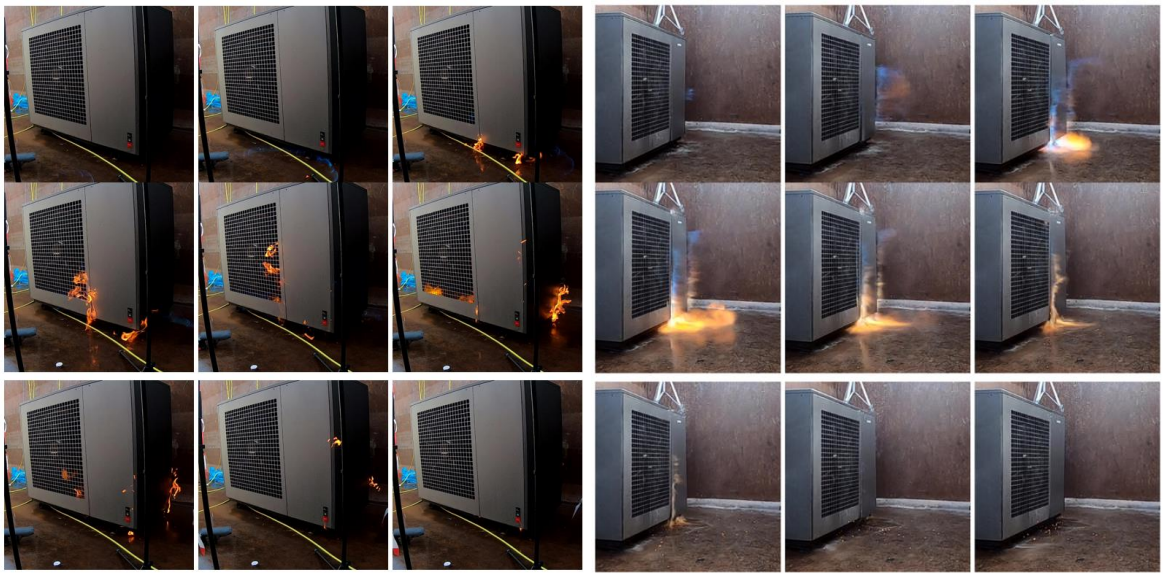

Abbildung 6: Links: Bildsequenz von 9 Bildern über 1,6 s von einem Zündereignis an einer vor dem Gerät im Abstand von ca. 50 cm platzierten Zündquelle (Teelicht), ausgetretene Leckagemasse ca. 150 g; **Rechts:** Bildsequenz von 9 Bildern über einen Zeitraum von 0,16 s einer Zündung einer annähernd stöchiometrischen R-290 / Luft Mischung im Maschinenraum

Mit den Versuchen und den weiteren Ergebnissen wurden die quantitativen Einzelfall-Risikoanalysen validiert. Hierbei hat sich vor allem gezeigt, dass, neben den bereits kleinen Wahrscheinlichkeiten für signifikante Leckagen, die vermutete Unfallschwere deutlich nach unten korrigiert werden konnte. Es traten insbesondere keine „fliegenden“ Teile oder gar Splitterteile auf. Die Flammenwirkung war in Zeit und Größe wenig signifikant.

4 Ergebnisse der Risikoanalyse

Die Ergebnisse der Untersuchung der ermittelten risikobehafteten Ereignisse im Lebenszyklus von Wärmepumpen für die verschiedenen Phasen I bis III der Risikoanalyse sind in die Risikomatrix (siehe **Abbildung 7**) eingetragen. In der Abbildung sind die Häufigkeiten des Auftretens eines gefährlichen Ereignisses für Wärmepumpen und die dazu ermittelte Unfallschwere, d.h. das personenbezogene Schadensausmaß des Ereignisses, in Form von farbigen Kreisen dargestellt. Der anzustrebende Bereich ist durch die grünen Felder gekennzeichnet (vernachlässigbar/tolerabel). Es wurden nicht alle 49 untersuchten Ereignisse eingetragen, einige Ereignisse wurden bereits in der ersten Phase als akzeptabel erkannt, entsprechend dokumentiert und erforderliche Aktionen und Maßnahmen eingeleitet. Die Mehrzahl von Ereignissen wies eine Häufigkeit von kleiner 10^{-8} auf und wurde deshalb unterhalb des entsprechenden grünen Feldes eingetragen.
Es wird deutlich, dass eine Vielzahl risikobehaftete Ereignisse bereits in Phase I den akzeptablen grünen Feldern zugeordnet werden konnten. Das Risiko lässt sich mit risikomindernden Maßnahmen reduzieren. Nach nochmaliger Bewertung der signifikanten Einzelfälle in Phase II mit Hilfe der Einzelfall-Risikoanalyse konnten die Annahmen für die Unfallschwere und die Häufigkeiten der Ereignisse revidiert werden. Nach der Validierung durch Versuche in Phase III (orange markierte Kreise) erfolgte eine abschließende Beurteilung.

In Abbildung 7 sind die Ergebnisse für einen typischen Risiko-Beurteilungsprozess mit anfänglich sehr konservativer Einschätzung der Situationen eingetragen. In nachfolgenden Beurteilungen der gleichen Situationen mit deutlich besserem Verständnis der Leckageereignisse und deren Ursachen, der Zündeffizienz und der sich ausbildenden Konzentrationsverläufe wird schrittweise ein besseres Verständnis der tatsächlichen Zusammenhänge für die Auswirkungsbetrachtungen erreicht, d.h. die Häufigkeiten für das Eintreten eines Ereignisses liegen tendenziell niedriger als anfänglich in Phase I angenommen.

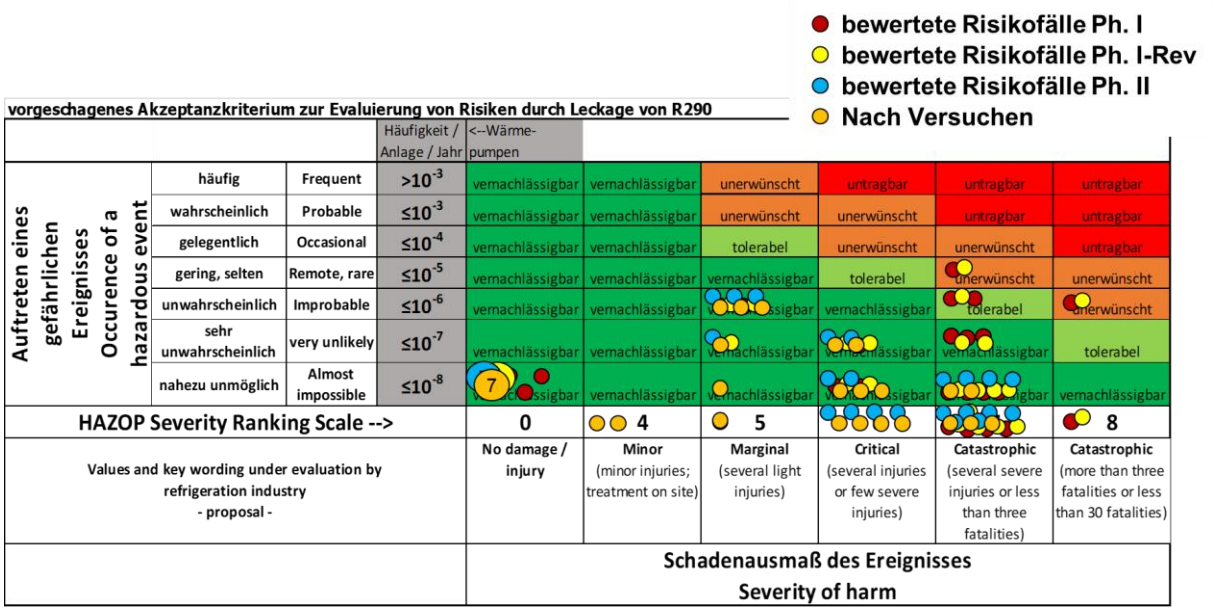

Abbildung 7: Risikomatrix mit Eintragung der untersuchten risikobehafteten Ereignisse in Form von farbigen Kreisen für die verschiedenen Phasen der Risikoanalyse für außen aufgestellte Wärmepumpen

Grundsätzlich sind Fälle mit konservativ angenommenen fatalen Konsequenzen (Unfälle, menschliches Versagen) weiter untersuchbar. Aufgrund der bereits sehr geringen Häufigkeit und den sehr konservativen Annahmen zu den Einzelfall-Risikoanalysen (z.B. zeitgleiche Windstille im Außenbereich bei Vorliegen eines zündfähigen Gemisches) wurde entschieden, keine weiteren Bewertungen vorzunehmen, da bereits hinreichend niedrige Häufigkeiten vorlagen.

5 Zusammenfassung

Für außen aufgestellte Wärmepumpen wurden für den gesamten Lebenszyklus 49 risikobehaftete Fälle im Zusammenhang mit Leckagen von R-290 untersucht und bewertet.

Es hat sich gezeigt, dass Risiken für den Einsatz von R-290 in Wärmepumpen von GDD im Normalbetrieb nicht vorhanden bzw. vernachlässigbar sind. In fehlerhaften Betriebszuständen oder unfallartigen Situationen oder bei Missbrauch sind die Unfallschweren für die verschiedenen risikobehafteten Ereignisse im Lebenszyklus von außen aufgestellten Wärmepumpen weniger signifikant als ursprünglich angenommen, vor allem aber extrem unwahrscheinlich. Es wurde ein vertretbares Risiko ermittelt, welches bei Wärmepumpen für den häuslichen Bereich, in Industrie und im Gewerbe basierend auf den aktuellen Werten der Gesellschaft als akzeptiert erscheint, insbesondere da unfallartige Ereignisse, ebenso wie menschliches Versagen und vorhersehbarer Fehlbetrieb betrachtet wurden. Ein Vergleich zu Risiken des alltäglichen Lebens sowie zu Unfallstatistiken unterstreicht dieses Ergebnis.
Aus diesem Ergebnis lässt sich auch ableiten, dass einer breiteren Einführung von R-290 in der Wärmepumpenindustrie keine technischen Unwägbarkeiten entgegenstehen. Dazu sind bestehende konservative Normen kritisch zu hinterfragen.

6 Nomenklatur

FMEA: Failure Mode and Effects Analysis (Auswirkungsanalyse)
FMECA: Failure Mode and Effects and Criticality Analysis (Auswirkungsanalyse)
FTA: Fault Tree Analysis (Fehlerbaumanalyse)
HAZOP: Hazard and Operability Studies (Risikoanalyse für Lebensphasen des Produkts)
ETA: Event Tree Analysis (Ereignisbaumanalyse)
UEG: Untere Explosionsgrenze
WP: Wärmepumpe

7 Literaturverzeichnis

[1] König, H.: *Sustainable Refrigeration, What is sustainability and how to determine?* 15th IIR-Gustav Lorentzen conference on Natural Refrigerants, 2022, June 13-15, Trondheim, Norway
[2] Boeck, L., König, H.: *Vergleich von Kältemitteln für die Bahnklimatisierung*, DKV Jahrestagung 2019, Ulm
[3] Colbourne, D. et.al.: Leak hole sizes from refrigeration, air conditioning and heat pump systems, IJR, 2021
[4] König, H.: *Risikoanalyse, Hürde oder Innovationswerkzeug,* Vortrag Chillventa Congress 2018, Nürnberg
[5] Boeck, L., Mallow, D.: *Natürliche Kältemittel in Schienenfahrzeugen*, Brandschutzfachtagung Virtuell, July 2021
[6] Wabtec, https://www.wabteccorp.com/newsroom/press-releases/wabtec-begins-trial-of-transit-rail-industry-s-first-environmentally-friendly-air-conditioning, 2020
[7] HOLTAPPELS K., BARARU M., KÖNIG H. PRACTICAL TESTS WITH R290 USED IN CONTAINER REFRIGERATING SYSTEM REFRIGERATION, LEAKAGE TESTING, 12th IIR Gustav Lorentzen Natural Working Fluids Conference, Edinburgh, 2016