

Frostschaden tarnt sich als Explosion

Ein als Explosion getarnter Frostschaden beschäftigt gleich mehrere Fachabteilungen des IFS und weitere Prüflabore^[1] – ein eindrucksvoller Schadenfall mit einer trivialen Ursache.

Auf den folgenden Seiten sollen der Schaden selbst, die Herangehensweise des IFS bei dessen Ursachenermittlung und die mögliche Schadenverhütung vorgestellt werden.



Bild 1 / Der Anbau mit Garage und Hauswirtschaftsraum ist beinahe vollständig zerstört.

Ende Januar 2020 wird das IFS per Mail mit einer Brandursachenermittlung beauftragt – Alltag. Einziger Hinweis: Es soll sich um einen Explosionsschaden handeln.

Das wiederum lässt den Empfänger der Nachricht aufhorchen: Laut der IFS-Brandursachenstatistik stellen Explosionen mit einem Anteil von nur etwa 2 % eine der seltensten Brandursachen dar.^[2] Der erste Ortstermin findet gleich am Folgetag im ländlichen Idyll eines kleinen Dorfes bei tiefsten Minusgraden statt. Der Schadenort selbst stellt sich weniger idyllisch dar: Von dem in den 2000er-Jahren erstellten Anbau mit Garage und Hauswirtschaftsraum eines Wohnhauses stehen nur noch einige

wenige Teile der Außenwände (**Bild 1**). Die „fehlenden“ Wandbereiche sind nach außen weggedrückt worden und liegen auf dem Boden. Ein sicherer Beleg für eine flächige Krafteinwirkung, ausgehend vom Inneren des Anbaus, wie bei einer Verpuffung („Explosion“) zu erwarten. Das Dach ist abgerutscht und liegt auf den Trümmern auf. Aufgrund der Einsturzgefahr muss man sich bei dem ersten Ortstermin auf eine äußere Inaugenscheinnahme beschränken, bevor das Dach entfernt wird. Allerdings ist bereits zu diesem Zeitpunkt sicher, dass es sich um eine Verpuffung handelt. Auch wenn zwischen einer Explosion und einer Verpuffung streng genommen unterschieden werden muss,^[3] gelten für beide Szenarien die gleichen Voraussetzungen:

Es muss ein möglichst homogenes Gemisch aus Luft und einer brennbaren Substanz innerhalb der Explosionsgrenzen vorgelegen haben und gezündet worden sein. Als brennbare Substanzen kommen zum Beispiel Mehlstaub und Bärlappsporen als feinverteilte Feststoffe infrage oder aber – und vor allem – Gase. Da es sich bei dem Wohnhaus um keine Mühle und bei den Eigentümern um keine „Pyrotechniker“ handelte und auch sonst nichts auf diese Art von Substanzen hinwies, war ein Feststoff als ursächliche brennbare Substanz auszuschließen. Nach dem Entfernen des Daches konnte der Anbau bei einem zweiten Ortstermin weiter in Augenschein genommen werden. Dabei stellte sich heraus, dass die Verpuffung



Bild 2 / Die Türbänder (hier das untere Türband) der Tür zum Hauswirtschaftsraum sind im geschlossenen Zustand nach außen verbogen und teilweise aus dem Türrahmen gedrückt.

ihren Ursprung im Hauswirtschaftsraum (HWR) hatte, wie an den im geschlossenen Zustand nach außen verbogenen und teilweise aus dem Türrahmen herausgedrückten Türbändern zu belegen ist (**Bild 2**). Innerhalb des Hauswirtschaftsraumes befindet sich die Heizung und Warmwasserbereitung (**Bild 3**). Entgegen der ersten Erwartungen handelte es sich aber nicht um eine Gastherme oder auch nur um eine mit fossilen Brennstoffen betriebene Anlage. Stattdessen handelte es sich „nur“ um die Steuerung und den Wärmespeicher einer im Außenbereich stehenden Luft-Wasser-Wärmepumpe (**Bild 4**). Eine Luft-Wasser-Wärmepumpe arbeitet nach dem

Bild 3 / Blick in den Hauswirtschaftsraum mit der Heizung und der Warmwasserbereitung



Prinzip des Joule-Thomson-Effektes. Dabei wird der Umgebungsluft Energie entzogen, indem diese durch einen sogenannten Verdampfer geführt wird. Durch den Verdampfer zirkuliert ein Kältemittel, das bei einer niedrigeren Temperatur als die Temperatur der Umgebungsluft in den gasförmigen Aggregatzustand übergeht. Für das Verdampfen wird nunmehr die Energie benötigt, die der Umgebungsluft entzogen wird. Anschließend wird das Kältemittel wieder komprimiert sowie verflüssigt, wodurch die Temperatur steigt. Die dafür ursächliche, von der Umgebungsluft aufgenommene Energie wird nunmehr in einem Wärmetauscher an ein Sekundärwärmeträgermedium weitergegeben, das dann zum Beispiel einen Wärmespeicher speist. Bei der hier verbauten Luft-Wasser-Wärmepumpe werden 1,17 kg des Kältemittels R290 verwendet. R290 steht für Propan. Das brennbare Gas und somit ein potenzieller Auslöser der Explosion/Verpuffung ist damit also gefunden: Propan besitzt eine untere Explosionsgrenze von 2,2 Vol-% und eine obere Explosionsgrenze von 9,5 Vol-% in Luft.^[4] Der Heizraum hat eine Grundfläche von etwa 3 x 2 m und eine Höhe von etwa 2,5 m. Das Volumen beträgt somit etwa 15 m³. Entsprechend müssten mindestens 0,33 m³ und dürfen höchstens 1,42 m³ Propan gas in den Raum gelangt sein, bevor es zur Zündung kam. Bei Normaldruck entsprechen 1,17 kg Propan einem Volumen von 0,582 m³ bzw. 582 L.^[5] Also bereits etwas mehr als die Hälfte des

Bild 4 / Hinter dem Haus steht eine Luft-Wasser-Wärmepumpe.



Propan aus dem Kältekreislauf hätte für die Ausbildung einer explosionsfähigen Atmosphäre in dem Hauswirtschaftsraum ausgereicht und auch die vollständige Freisetzung des gesamten Propan hätte noch nicht zu einem für eine Explosion zu fetten Gemisch geführt. Fraglich war nunmehr allerdings, ob und, wenn ja, wie das Propangas überhaupt von dem Kältekreislauf in der Wärmepumpe außerhalb der Gebäudes in den Hauswirtschaftsraum im Inneren des Gebäudes gelangen konnte. Dies konnte einzig über das Sekundärwärmeträgermedium (Wasser) geschehen sein. Vor Ort wird festgestellt, dass in dem Sekundärkreislauf im Inneren des Gebäudes noch immer ein Druck von knapp 1,9 bar herrschte (**Bild 5**).



Bild 5 / Das Manometer im Sekundärkreislauf im Inneren des Hauswirtschaftsraumes zeigt einen Druck von etwa 1,9 bar an.

Im Bereich des Manometers aus Bild 5 waren auch ein Überdruckventil und ein automatisches Entlüftungsventil verbaut. Hier konnte das Gas innerhalb des Hauswirtschaftsraumes austreten und sich ab dem Erreichen der unteren Explosionsgrenze an einem beliebigen Schaltfunken entzünden. Bis hierhin war demnach bewiesen, dass es sich um eine Verpuffung handelte, die einzig durch das Gas ausgelöst worden sein konnte, das aus dem Kältekreislauf der Wärmepumpe stammte und über das Überdruckventil oder das automatische Entlüftungsventil ausgeströmt sein musste. Bei dem Kältekreislauf, der sich außerhalb des Gebäudes befand, handelte es sich allerdings um ein geschlossenes System, das nur im energetischen Austausch über den mit Wasser gefüllten ►



Bild 6 / Das Manometer, das an den Kältekreislauf außerhalb des Gebäudes angeschlossen wurde, zeigt 1,83 bar vor (links) und hinter (rechts) dem Verdichter an.

Sekundärkreislauf mit dem Inneren des Gebäudes in Kontakt kam, nicht jedoch im stofflichen Austausch. Nunmehr stellte sich weiterhin die Frage, wie das Kältemittel aus dem Kältekreislauf in den Sekundärkreislauf hatte gelangen können. An den Kältekreislauf wurde dazu ebenfalls ein Manometer angeschlossen, das den Druck vor und hinter dem Verdichter erfasste. An beiden Messpunkten wurde ein Druck von 1,83 bar gemessen (**Bild 6**). Während ein Druck von etwa 4,5 bar im ausgeschalteten Zustand des Verdichters erwartet worden wäre, entsprechen die gemessenen 1,83 bar, im Rahmen des Messfehlers, demselben Innendruck wie in dem zuvor beschriebenen Sekundärkreislauf. Beim Eindrücken des Ventils zum Anschluss des Manometers an den Kältekreislauf aus **Bild 6** strömte Wasser aus dem Kältekreislauf (**Bild 7**). Wasser war in dem Kältekreislauf jedoch nicht zu erwarten gewesen; dieses konnte nur aus dem Sekundärkreislauf stammen. Auf Grundlage dieser beiden Beobachtungen ergab es sich, dass der Kältekreislauf und der Sekundärkreislauf miteinander in Kontakt und im Stoffaustausch stehen müssen. Der einzige Bereich, in dem der Kältekreislauf und der Sekundärkreislauf in Kontakt stehen, jedoch normalerweise stofflich voneinander getrennt sind, ist der Wärmetauscher; in diesem Fall ein Plattenwärmetauscher. Der hier verwen-

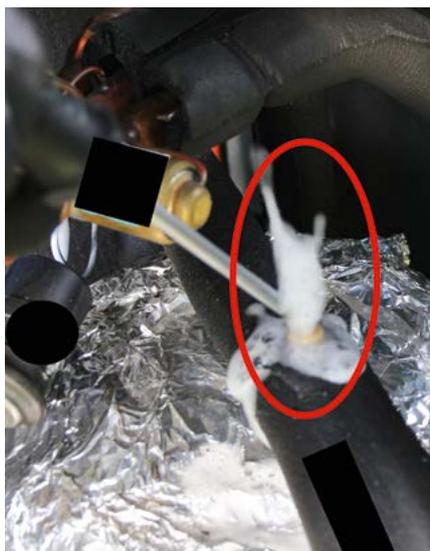


Bild 7 / Beim Eindrücken des Ventils strömt Wasser aus dem Kältekreislauf (rote Markierung).

dete Plattenwärmetauscher besitzt zwei Ein- und zwei Ausgänge: jeweils einen Ein- und Ausgang für den Kältekreislauf und einen Ein- und Ausgang für den Sekundärkreislauf. Er besteht aus über 20 wasserführenden (Sekundärkreislauf) und über 20 gasführenden Schichten (Kältekreislauf), jeweils aus Edelstahl mit dazwischen liegenden Kupferlagen. Es stand daher zu vermuten, dass der Plattenwärmetauscher eine Undichtigkeit aufwies. Vor Ort ließ sich diese Hypothese nicht weiter belegen, daher wurde der Plattenwärmetauscher ausgebaut und anderenorts weiter untersucht. Um die Hypothese zu belegen, wurde an dem einen Eingang ein Schraubventil angeschweißt und der korrespondierende Ausgang gasdicht verschlossen.

Bild 8 / Ein auf der Sekundärkreislaufseite aufgesteckter Ballon wird aufgeblasen, wenn an der Kältekreislaufseite Druck angelegt wird und alle Ausgänge verschlossen werden.

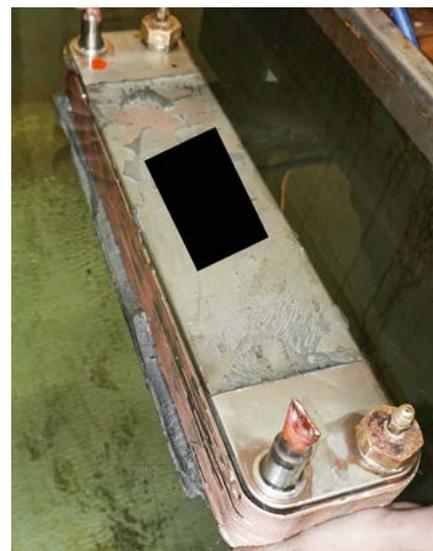


Bild 9 / Nach außen hin ist der Plattenwärmetauscher dicht.

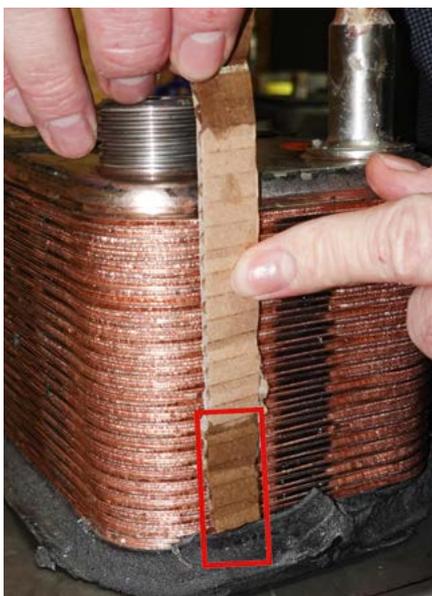
Nun wurde auf den anderen Eingang ein Ballon aufgesteckt und an das Schraubventil eine Gasflasche angeschlossen und diese geöffnet. Nachdem auch der zweite Ausgang zugehalten wurden, blies sich der Ballon auf (**Bild 8**). Ein weiterer Versuch zeigte, dass der Plattenwärmetauscher nach außen hin allerdings dicht ist, da beim Eintauchen in Wasser und angelegter Druckluft bei ansonsten verschlossenen Ein- und Ausgängen keine Blasen austraten (**Bild 9**). Zuletzt wurde der Plattenwärmetauscher bei laufendem Druckluftstrom mit Wasser befüllt. Sobald „Blubber“-Geräusche zu vernehmen waren, wurde die Befüllung unterbrochen und ein Stück Pappe in einen der Eingänge gehalten. Auf diese Weise konnte zumindest festgestellt werden, auf welcher Höhe sich die Undichtigkeit befindet (**Bild 10**).

Nach Abschluss dieser Untersuchungen war belegt, dass es eine Undichtigkeit mit der Möglichkeit eines Stoffaustausches zwischen dem Kältekreislauf und dem Sekundärkreislauf gab. Die letzte Frage, die nunmehr noch zu klären blieb, war, wie diese Undichtigkeit entstanden ist, zumal die Luft-Wasser-Wärmepumpe nur wenige Wochen vor dem Schaden gewartet worden war. War es möglicherweise zu einem Wartungsfehler gekommen, einem Produktfehler oder einem



Fehler aufgrund falscher Betriebsbedingungen? Beim Ablassen des Wassers wurden aus dem Inneren des Plattenwärmetauschers mehrere, wenige Millimeter große Partikel aufgefangen. Diese wurden im IFS-Labor in Kiel mittels eines Rasterelektronenmikroskops und energiedispersiver Röntgenspektroskopie untersucht. Auf diese Weise kann die chemische Zusammensetzung der Partikel festgestellt werden. Es zeigte sich, dass einige Partikel hauptsächlich aus Kupfer und einige hauptsächlich aus Eisen (Hauptbestandteil von Stahl) bestehen (Bild 11 und 12). Bei diesem Plattenwärmetauscher liegen nur im Bereich der Verpressungen der einzelnen Platten sowohl eisenhaltige als auch aus Kupfer bestehende Bestandteile vor. Es war daher davon auszugehen, dass es im Bereich der Verpressungen zu einer Undichtigkeit gekommen war. Eine ebenfalls beim zweiten Ortstermin entnommene Probe des Wassers aus dem Sekundärkreislauf wurde im Labor auf die Eignung als Heizungswasser gemäß VDI 2035-2 untersucht. Der Chloridgehalt als Auslöser von Lochkorrosionsvorgängen befand sich deutlich unter der Vorgabe von 30 mg/L. Nach DIN EN 14868 wäre sogar erst ab einer Konzentration von 50 mg/L Chlorid mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit von Lochkorrosion bei Kupfer zu rechnen; die Trinkwasserverordnung erlaubt sogar einen noch deutlich höheren Chloridgehalt. Auch die weiteren Analyseergebnisse gaben

Bild 10 / Die Leckage befindet sich auf Höhe des unteren Drittels des Plattenwärmetauschers (rote Markierung).



keinen Anlass zu der Vermutung, dass es sich um eine durch Korrosionsvorgänge ausgelöste Undichtigkeit handelte oder das verwendete Wasser nicht als Heizungswasser geeignet war. Für die weitere zerstörungsfreie Untersuchung wurde der Plattenwärmetauscher einer Computertomographie (CT-Scan) unterzogen. Ein CT-Scan ist wohl eher aus der medizinischen Diagnostik bekannt. Im Fall von Werkstücken werden diese mit Hilfe einer Röntgenquelle unter schrittweiser Drehung „durchstrahlt“, im Gegensatz zu den medizinischen CT-Scans, bei denen sich die Strahlenquelle und der Detektor bewegen. Die Einzelbilder, die auf dem Detektor auftreffen, werden im Computer zu 3-D-Bilderstapeln zusammengesetzt, die bei der Auswertung entlang jeder Raumrichtung „durchfahren“ werden können. Bei der vorliegenden Untersuchung wurde eine Auflösung jeder einzelnen so entstehenden Bildlage von 0,15 mm in jede Raumrichtung gewählt, sodass das gesamte Werkstück aus sogenannten „Voxeln“ mit einem Volumen von je gerade einmal 0,003375 mm³ zusammengesetzt werden kann. Die Bilder sind somit erstaunlich gut aufgelöst, insbesondere wenn man bedenkt, dass hier die Werkstoffe Stahl und Kupfer „durchleuchtet“ wurden (die CT-Scans wurden von der iWP GmbH in Neuss durchgeführt). Die Ergebnisse können sowohl als 3-D-Modelle wie auch als Schnitte durch festlegbare Ebenen als 2-D-Plot dargestellt werden. Die Ergebnisse des CT-Scans brachten dann auch den Durchbruch, im wahrsten Sinne des Wortes!

Auf Bild 13 ist ein Scan als 2-D-Plot durch einen der Eingänge entlang der x-y-Ebene (Draufsicht) gezeigt. Hier ist, wie bereits zu erwarten war, eine Undichtigkeit im Bereich der Verpressung etwa auf halber Höhe des Plattenwärmetauschers zu erkennen. Allerdings war noch eine weitere Undichtigkeit in der nächsten Schicht zu erkennen (Bild 14). Eine dritte, jedoch viel kleinere Undichtigkeit wurde schließlich auch noch nur etwa 3 cm über dem Boden des Wärmetauschers festgestellt (keine eigene Abbildung). Besonders eindrucksvoll ist dieser Befund allerdings in dem ▶

Bild 11 / Eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Partikels (oben), das laut Analyse der energiedispersiven Röntgenspektroskopie (unten) hauptsächlich aus Kupfer (Cu) besteht.

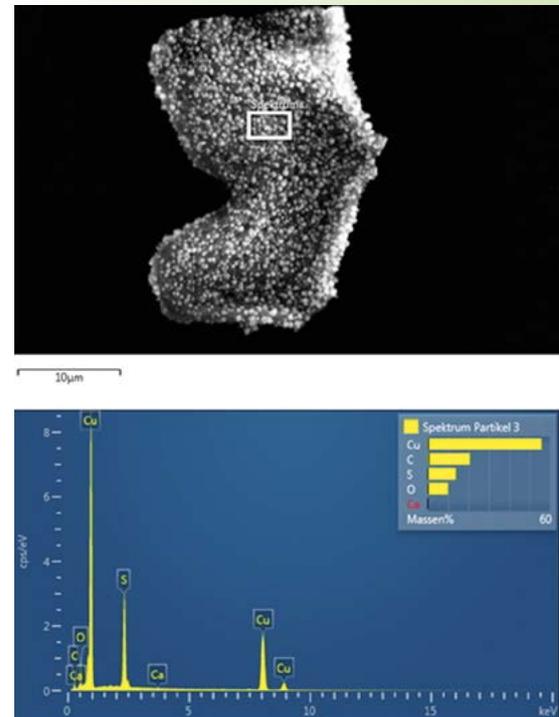
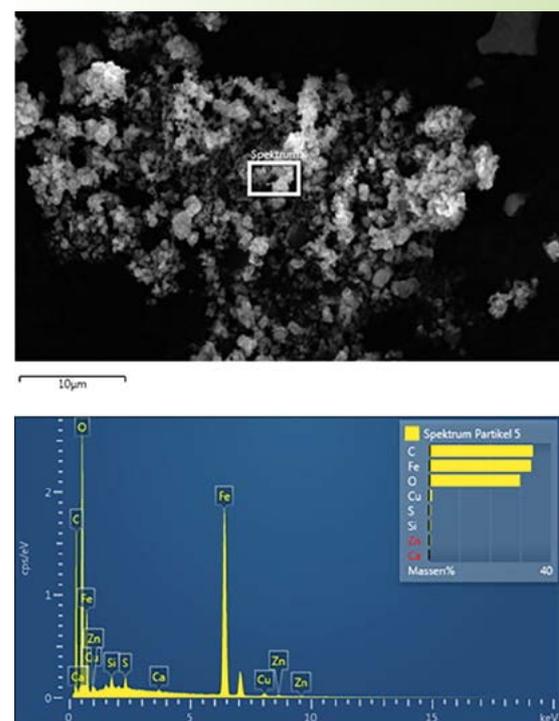


Bild 12 / Eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Partikels (oben), das laut Analyse der energiedispersiven Röntgenspektroskopie (unten) hauptsächlich aus Eisen (Fe) besteht.



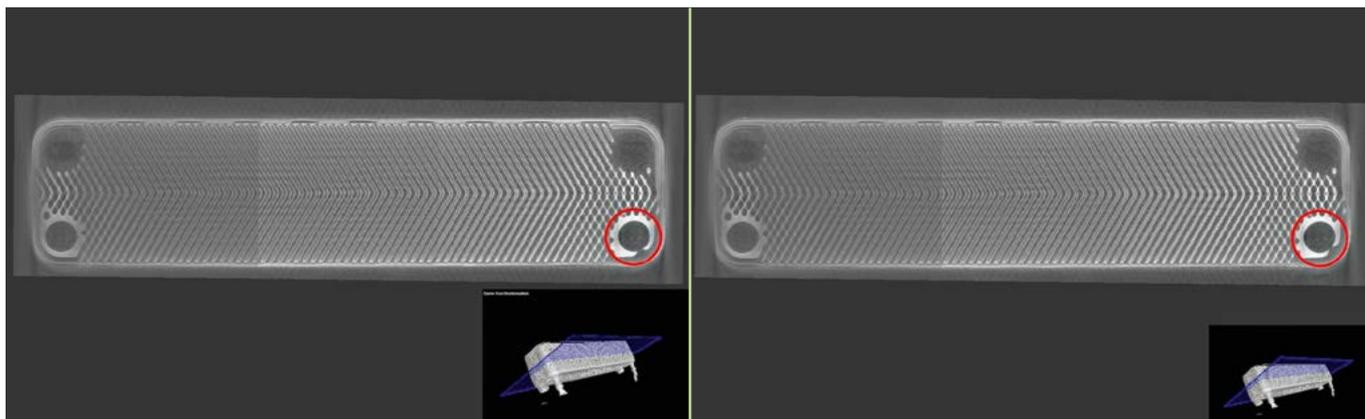


Bild 13 / 2-D-Plot des CT-Scans durch die x-y-Ebene (Draufsicht): Rot markiert ist die Undichtigkeit im Bereich eines Einlasses etwa auf halber Höhe.

Bild 14 / Nächste Lage vom 2-D-Plot des CT-Scans durch die x-y-Ebene (Draufsicht): Rot markiert ist die Undichtigkeit im Bereich eines Einlasses etwa auf halber Höhe.

3-D-Modell auf **Bild 15** zu erkennen. Auch auf dem 3-D-Modell mit Blick entlang der y-Achse auf die x-z-Ebene (Seitenansicht) sind die Undichtigkeiten gut zu erkennen (**Bild 16**). Aus physikalischen Gründen müssen alle drei Undichtigkeiten nahezu zeitgleich entstanden sein und auf einen erhöhten Innendruck zurückgeführt werden: Wären die Undichtigkeiten zeitversetzt entstanden, hätte sich der Druck bereits über die erste Undichtigkeit abgebaut und hätte nicht mehr für die Entstehung weiterer Undichtigkeiten zur Verfügung gestanden. Das Vorliegen von mehreren Undichtigkeiten innerhalb eines Systems, welche auf einen erhöhten Innendruck zurückzuführen sind, sind einzig damit zu erklären, dass der Überdruck nach der ersten Beschädigung nicht abgebaut worden ist. Dies ist aber nur dann möglich, wenn die entsprechende Leitung an mehreren Stellen verstopft bzw. verschlossen ist. Außerdem wird der für das mechanische Versagen im vorliegenden Werkstück benötigte Druck einzig durch eine Frosteinwirkung erreicht. Zwei oder mehr Eispropfen führen zunächst zu einem oder mehreren abgeschlossenen Volumina. Die anschließende Volumenzunahme durch die Umwandlung weiteren Wassers vom Aggregatzustand „flüssig“ zu „fest“ innerhalb dieser Volumina führt zu einer so starken Druckerhöhung, dass das Material in diesen Bereichen aufbricht. Da die Eispropfen an mehreren, räumlich getrennten Stellen auftreten können, sind dann auch mehrere schadhafte Stellen

gleichzeitig möglich und für einen Frostschaden sogar typisch, wie er auch im vorliegenden Fall stattgefunden hat. Entsprechend zeigt die Auswertung der Wetterdaten, dass an den drei, dem Schadenort am nächsten liegenden Wetterstationen an Datum/Tagen vor dem Schadeneintritt Tiefsttemperaturen von unter dem Gefrierpunkt gemessen wurden (**Bild 17**). Somit waren die Voraussetzungen für einen frostbedingten Schaden gegeben: Es herrschten über einige Tage Tiefsttemperaturen von unter dem Gefrierpunkt. Und es wurden die klassischen Belege für einen Schaden aufgrund von Frosteinwirkung gefunden.

In der Gesamtschau dieses Schadens ist die Ursache doch als recht trivial zu

bezeichnen, jedoch wurde eine beeindruckende Kette von Ereignissen damit in Gang gesetzt: Zunächst froh das Wasser aus dem Sekundärkreislauf ein – obwohl die Heizung laut ausgelesenem Betriebsprotokoll im „Heizbetrieb“ war. Die eigentliche Ursache muss somit als „technischer Defekt“ bezeichnet werden, auf den hier jedoch nicht weiter eingegangen werden soll. In der Folge drückte das gefrierende Wasser die Verpressungen in dem Wärmetauscher auseinander und es entstanden die aufgefundenen Undichtigkeiten, die zu diesem Zeitpunkt jedoch noch von dem Eis verschlossen gehalten wurden. Erst im Verlauf des Tages und beim Erreichen von Temperaturen über dem Gefrierpunkt (nicht gezeigt), schmolz das Eis und gab den Weg für das unter Druck stehende

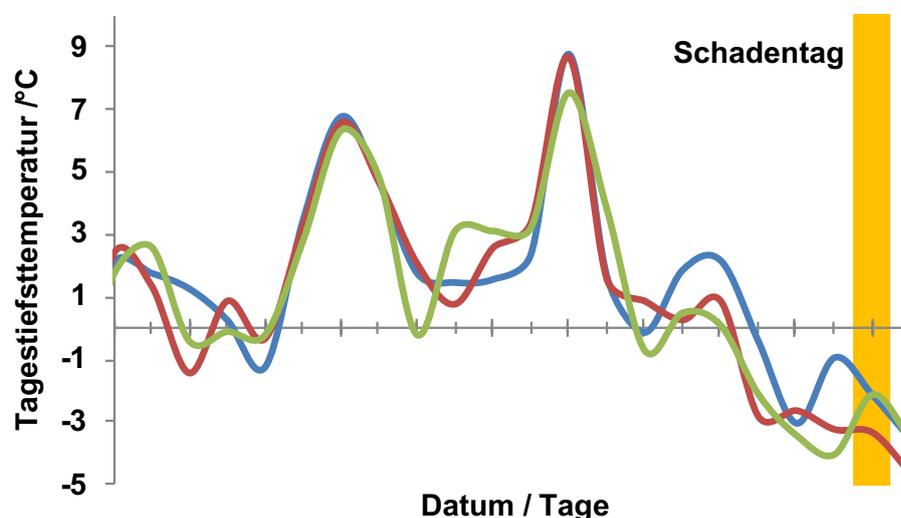


Bild 17 / Auswertung der gemessenen Temperaturen von den drei dem Schadenort am nächsten gelegenen Wetterstationen

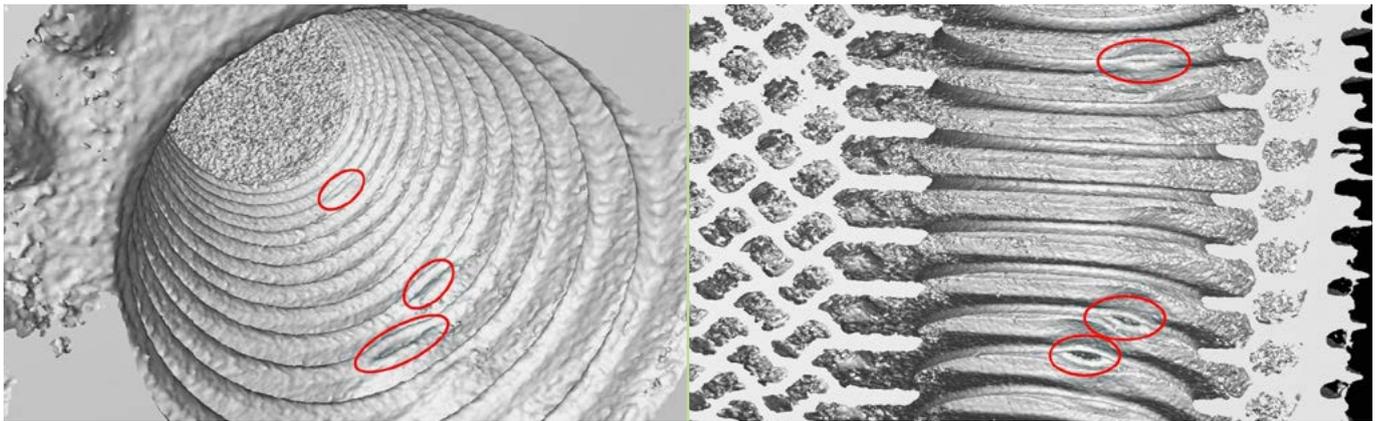


Bild 15 / Stark vergrößertes 3-D-Modell des CT-Scans mit Blick in den Einlass hinein. Rot markiert sind die drei festgestellten Undichtigkeiten.

Bild 16 / Stark vergrößertes 3-D-Modell des CT-Scans mit Blick entlang der y-Achse auf die x-z-Ebene (Seitenansicht). Rot markiert sind die drei festgestellten Undichtigkeiten.

Propangas frei. Dieses strömte in den Sekundärkreislauf ein, durch diesen in den Hauswirtschaftsraum im Inneren des Gebäudes und dort aus dem automatischen Entlüftungsventil bzw. dem Überdruckventil aus. In der Folge sammelte sich das Propangas dort und wurde zum Beispiel durch einen Zünd- bzw. Schaltfunken zur Verpuffung gebracht, mit der Folge eines weitgehenden Abtrags des Anbaus. Glücklicherweise hielt sich zum Zeitpunkt des Schadens niemand in dem Gebäude auf, sodass keine Personenschäden zu beklagen waren.

Wie hätte der Schaden nun aber verhindert werden können?

Bei dem hier dargestellten Schadenereignis handelt es sich um einen Frostschaden – auch wenn die Umstände besonders und die Auswirkungen außergewöhnlich sind. Frostschäden lassen sich im Allgemeinen sehr einfach vermeiden: Dazu muss lediglich eine

ausreichende Beheizung des Gebäudes sichergestellt werden. Steht ein Gebäude leer oder wird es vorübergehend nicht genutzt, so muss die ausreichende Beheizung auch regelmäßig kontrolliert werden. Kann eine durchgehende Beheizung nicht sichergestellt werden – aus welchen Gründen auch immer –, ist es geboten, andere Maßnahmen zu ergreifen, die einen Frostschaden sicher verhindern können. In der Regel sind die Alternativen allerdings überschaubar. Entweder muss sämtliches Wasser aus den Leitungen entfernt werden oder man prüft die Zugabe eines Frostschutzmittels. In einigen Installationen bietet sich der Einsatz von Zusatz- oder Begleitheizungen an, um ein Einfrieren der Leitungen zu vermeiden. Dass dieser Frostschaden in der Folge eine Explosion/Verpuffung ausgelöst hat, ist in der Verwendung eines brennbaren Kältemittels begründet. Dieses Ereignis hätte nur verhindert werden können, wenn als Kältemittel ein nicht brenn-

bares Gas verwendet worden wäre, dann hätte es zumindest zu keiner Verpuffung kommen können. Allerdings sind die Alternativen zumeist giftig oder haben andere handfeste Nachteile. Stattdessen könnte das Überdruckventil bereits in den Außenbereich verlegt werden, wobei hier zu befürchten stünde, dass dieses ebenfalls bei tiefen Temperaturen einfrieren und den Dienst versagen könnte. Als einfachste Möglichkeit der Schadenverhütung wäre auch hier die Verwendung eines Frostschutzmittels im Sekundärkreislauf gewesen. Abschließend ist in jedem Fall festzuhalten, dass Wärmepumpen nach Erfahrung des IFS sehr sicher sind: In den über 20.000 Einträgen in der IFS-Schadendatenbank zur Brandursachenermittlung ist nur ein ähnlich gelagerter Schaden zu finden. Allerdings konnte es dort, wie auch in diesem Fall, nur durch die Verkettung vieler ungünstiger Faktoren sowie weiterer hier nicht diskutierter Einflüsse zu dem Schaden kommen. ▲

Dr. Matthias Klaper,
Institut für Schadenverhütung und Schadenforschung
der öffentlichen Versicherer e. V.

Quellen und weiterführende Literatur/Erklärungen

- (1) Die Untersuchungen am Schadenort und am Asservat wurden durch Mitarbeiter des IFS durchgeführt. Ebenso wurden die REM/EDX-Untersuchungen und die Analyse des Heizungswassers auf Rückstände des Propanes im IFS durchgeführt, letztere mit negativem Ergebnis, daher wurde sie nicht gezeigt. Die Untersuchungen der genommenen Wasserprobe zur Eignung als Heizungswasser und die CT-Untersuchungen wurden durch externe Labore durchgeführt.
- (2) IFS-Brandursachenstatistik, <https://www.ifs-ev.org/schadenverhuetung/ursachenstatistiken/ursachenstatistik-brandschaeden-2020/>
- (3) Eine Verpuffung ist eine Grenzerscheinung der Explosion und zeichnet sich durch eine Fortpflanzung der Verbrennung mit geringerer Geschwindigkeit als bei einer Explosion und einer eher schiebenden Wirkung mit eher kleinen Druckkräften aus.
- (4) „Handbuch der Feuer- und Explosionsgefahr – Chemische, physikalische und technische Grundlagen zur Verhütung und Bekämpfung der Feuer und Explosionsgefahr“, Dr. Ernst von Schwarz, 5. Auflage, Feuerschutzverlag Ph. L. Jung, München 1958.
- (5) Aus der Masse des Propanes m (1170 g) und dessen Molarer Masse M (44,10 g/mol) kann die Stoffmenge n an Propan bestimmt werden, die 1,17 kg entspricht: $n = M/m = 26,53$ mol. Ebenfalls über die Molare Masse M und die Dichte von Propan ρ unter Normalbedingungen (2,0098 g/L) kann das Molvolumen V_m von Propan unter Normalbedingungen bestimmt werden: $V_m = M/\rho = 21,94$ L/mol. Das Volumen V von 1,17 kg Propan kann nunmehr über die Stoffmenge n (26,53 mol) und das Molvolumen V_m (21,94 L/mol) bestimmt werden: $V = V_m \cdot n = 582$ L = 0,582 m³. Die Stoffdaten wurden aus der GESTIS-Stoffdatenbank abgerufen.