

# Positionspapier §

**IGV-PP-11B-Rev1**

Stand 24.06.2022

erstellt von

Expertengruppe "Behälter" (EG-B)

## **Beschaffenheitsanforderungen von Luftverdampfern**

**Haftungsausschluss:** Diese Veröffentlichung entspricht dem Stand des technischen Wissens zum Zeitpunkt der Herausgabe.

Der Verwender muss die Anwendbarkeit auf seinen speziellen Fall und die Aktualität der ihm vorliegenden Fassung in eigener Verantwortlichkeit prüfen.

Eine Haftung des IGV und derjenigen, die an der Ausarbeitung beteiligt waren, ist ausgeschlossen.

© Der IGV genehmigt hiermit die Vervielfältigung dieses Dokuments, vorausgesetzt, der Verband wird als Quelle angegeben.

## Inhaltsverzeichnis

1. Einführung.....	3
2. Geltungsbereich.....	3
3. Begriffsbestimmungen.....	4
4. Anzuwendende Normen, Richtlinien und Vorschriften.....	4
5. Werkstoffe.....	5
6. Berechnung.....	7
7. Schweißen von Luftverdampfer-Aluminiumlegierungen.....	8
8. Prüfungen während der Herstellung.....	11
9. Verbindungen (Crimpungen) von Rippenrohren untereinander und mit tragenden Bauteilen.....	12
10. Wiederkehrende Prüfungen.....	14
11. Zusammenfassung.....	15
Anhang: Anforderungen und Vorgehensweise bei Instandsetzungsarbeiten von Rissen an Aluminium- Luftverdampferschweißnähten.....	17
Referenzen.....	19

## 1. Einführung

Dieses Positionspapier soll – den Standpunkt des Industriegaseverbandes und somit der deutschen Produktanwender widerspiegelnd – Empfehlungen liefern, um für luftbeheizte Verdampfer aus Aluminiumrippenrohr („Luftverdampfer“) den Stand der Technik in Deutschland zu definieren. Anlass für die Erstellung dieses Positionspapiers sind bestehende Regelwerke, in denen Erkenntnisse aus den alten nationalen Regelwerken und Erfahrungen nicht ausreichend mit übernommen worden sind.

Luftverdampfer für die kryogenen Gase LIN, LOX, LAR und LCO<sub>2</sub> bestehen ausschließlich aus Rohranordnungen von Rippenrohren (Strangpressprofile), Sammelrohren, verbindenden Rohren, Eintritts- und Austrittsanschlüssen sowie strukturellen Bauteilen (gecrimppte Verbindungsklammern, Rahmen, Füße, Kranösen).

Die Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU (DGRL) [1] und die CEN-Normen legen Anforderungen für druckbeaufschlagte Arbeitsmittel fest, die innerhalb der EU verkauft werden sollen. Diese Normen beziehen sich in erster Linie auf die Konstruktion und Herstellung solcher Geräte und Aspekte ihrer technischen Leistungsfähigkeit und nicht auf die sichere Benutzung [2].

Die Erfahrung der letzten Jahre zeigt, dass die Mindestanforderungen der Druckgeräterichtlinie und internationalen Auslegungsnormen, wie sie von Herstellern und benannten Stellen interpretiert werden, ggf. nicht ausreichen, um Sprödbruch oder Rissbildung an Teilen von Luftverdampfern zu verhindern.

Gemäß dem "Blue Guide – Leitfaden für die Umsetzung der Produktvorschriften der EU 2016" [3] der EU-Kommission und der Richtlinie 2009/104/EG [4] über Mindestvorschriften für Sicherheit und Gesundheitsschutz bei Benutzung von Arbeitsmitteln durch Arbeitnehmer bei der Arbeit trägt der Endbenutzer (= Arbeitgeber) die volle Verantwortung für den sicheren Betrieb (und damit auch für die Spezifikation) des Luftverdampfers.

**Richtlinie 2009/104/EG Anhang I, 2.7.:** „Besteht bei Teilen eines Arbeitsmittels Splitter- oder Bruchgefahr, die die Sicherheit oder die Gesundheit der Arbeitnehmer erheblich gefährden könnte, so müssen geeignete Schutzvorkehrungen getroffen werden“.

Die Umsetzung der Richtlinie 2009/104/EG in nationales Recht ist die BetrSichV [5].

Dieses Positionspapier enthält ergänzende Empfehlungen zu den Normen und Vorschriften für die Auslegung, Herstellung, Prüfung und wiederkehrende Prüfungen von Luftverdampfern, für den sicheren Betrieb und die sichere Benutzung durch Arbeitnehmer.

## 2. Geltungsbereich

Dieses Positionspapier gilt für Aluminium-Rippenrohr-Verdampfer, welche die Energie für die Verdampfung aus der Umgebungsluft gewinnen, und zwar für die Betriebsmedien

- Flüssigstickstoff (LIN),
- Flüssigargon (LAR),
- Flüssigsauerstoff (LOX) sowie
- flüssigen Kohlendioxid (LCO<sub>2</sub>)

mit einem maximal zulässigen Betriebsdruck (Ps) in der Regel von 40 bar.

**Dieses Positionspapier gilt nicht für Aluminium-Rippenrohr-Verdampfer mit Innenrohren aus austenitischem Edelstahl.**

### 3. Begriffsbestimmungen

#### 3.1 Luftverdampfer

Luftverdampfer = luftbeheizter Verdampfer/Wärmetauscher: Druckgerät, welches aus Rohren und Hohlprofilen aus Aluminiumlegierungen besteht und zum Erwärmen bzw. Verdampfen von kryogenen Flüssigkeiten mittels Wärme aus der Umgebungsluft dient.

#### 3.2 Druckaufbauverdampfer

Es handelt sich auch um luftbeheizte Verdampfer (kleinere Konstruktionen), installiert unter oder neben den Kaltvergasern, zum Verdampfen von Flüssigkeit in einem geschlossenen Kreislauf zum Zweck der Druckerhöhung. Druckaufbauverdampfer sind Bestandteil der Baugruppe des Kaltvergasers im Sinne der DGRL.

#### 3.3 Crimpung

Der Begriff entstammt der Elektrotechnik und beschreibt die Verbindung von Kabelschuhen mit elektrischen Kabeln (DIN EN 60352-2). Bei Luftverdampfern, zur Verbindung der Rippenrohre untereinander mit den tragenden Bauteilen, werden spezielle Klammerprofile verwendet, die mit Crimpungen mit den Rippenenden der Rippenrohre unter plastischer Verformung (sichtbares Eindringen) des Klammerprofils mit dem Rippenende formschlüssig verbunden werden (siehe auch IGV-SH-03B-Rev0).

### 4. Anzuwendende Normen, Richtlinien und Vorschriften

Die anzuwendende europäische Richtlinie ist die **Druckgeräterichtlinie (DGRL) (Richtlinie 2014/68/EU)**.

Gemäß der DGRL-Leitlinie B-04 "Welche Art von Druckgerät ist ein Wärmetauscher?" werden Luftverdampfer als Druckbehälter klassifiziert, so dass die relevante harmonisierte EN-Norm die **EN 13445-8** ist [6]. Die EN 13445-8 verweist soweit erforderlich auf die anderen Teile der EN 13445, welche jeweils verbindlich anzuwenden sind.

Da die eigenständige Verwendung nicht vorgesehen ist, wird ein luftbeheizter Verdampfer oft als druckhaltendes Ausrüstungsteil (= Einrichtungen mit einer Betriebsfunktion, die ein druckbeaufschlagtes Gehäuse aufweisen) bezeichnet.

Aus der von der EU-Kommission veröffentlichten Liste der harmonisierten Normen zur Erfüllung der Druckgeräterichtlinie ergibt sich die Empfehlung, dass für luftbeheizte Verdampfer die EN 13445-8 anzuwenden ist, wobei ggf. zutreffende rohrleitungsspezifische Anforderungen in der **EN 13480-8** [7] berücksichtigt werden müssen.

### Ältere Luftverdampfer

Die Klassifizierung der Luftverdampfer als Druckbehälter war in den ersten Jahren der alten Druckgeräterichtlinie 1997/23/EG nicht eindeutig geregelt, die entsprechende Leitlinie II-04 erschien erst 2010. Die harmonisierte Norm EN 13445-8 erschien erstmalig 2006.

**Fazit:** Ältere Luftverdampfer gemäß RL1997/23/EG erfüllen u. U. nicht die heutigen Anforderungen der EN 13445-8:2021; ggf. kann nur die Einhaltung des Anhangs I der RL1997/23/EG unterstellt werden.

### AD2000-Merkblätter

Die AD2000-Merkblätter enthalten weitere Anforderungen, die ggf. zu berücksichtigen sind. Hierauf wird in den folgenden Abschnitten besonders eingegangen.

### Klassifizierung gemäß BetrSichV

BetrSichV Anhang 2, Abschnitt 4, Nr. 7.14 (e): „Druckbehälter zum Verdampfen von Gasen oder Gasgemischen, die auf die drucktragende Wandung keine korrodierende Wirkung haben und die ausschließlich aus Rohranordnungen bestehen.“

### TRBS-2141-2019-07 – Gefährdungen durch Dampf und Druck

Abschnitt 5.2.1, umfasst auch die Bewertung der Gefährdungen im Rahmen der Beschaffung, u. a.:

- Versprödungen, Wechselbeanspruchung
- Berücksichtigung von Möglichkeiten für die Prüfung der drucktragenden Wandung

### BG-Merkblatt T039 Druckprüfungen von Druckbehältern und Rohrleitungen [8]

Die Durchführung von Gasdruckprüfungen bei erstmaligen oder wiederkehrenden Prüfungen erfordert zusätzliche Maßgaben bei der Herstellung. Darauf wird in Abschnitt 10 eingegangen.

### ASME Code

In den USA und auch in Europa werden Luftverdampfer gemäß ASME VIII-1 oder ASME B31.3 hergestellt. Abnahmepflicht („U-Stamp“) besteht erst ab der Nennweite DN 150, so dass Hersteller auch vom ASME Code abweichen können. Es werden in der Regel keine objektgebundenen Durchstrahlungsprüfungen und keine Arbeitsprüfungen durchgeführt.

## 5. Werkstoffe

Die zulässigen Werkstoffe sind in EN 13445-8, Tabelle 5.6-1, gelistet: „Andere, hier nicht aufgeführte Werkstoffe dürfen nach Vereinbarung zwischen den beteiligten Parteien verwendet werden, sofern sie die Anforderungen nach 5.2 und 5.5 der EN 13445-8 erfüllen und ein Werkstoff-Einzelgutachten ausgestellt wird.“

### Vergleich der EN 13445-8 mit AD2000-W6-1 [9]

Das AD2000-W6-1 lässt aus der Werkstoffgruppe 23.1 gemäß CEN ISO/TR 15608 nur die Legierung EN AW 6060-T4 zu (frühere DIN-Bezeichnung: AlMgSi 0,5 F13).

#### 6060-T4 Eigenschaften (siehe EN 13445-8/EN12392)

Grundwerkstoff:  $R_{p0,2} = 60 \text{ MPa}$ ,  $R_m = 120 \text{ MPa}$

Berechnungsspannung  $f = 40 \text{ MPa}$  (= min [ $R_{p0,2} / 1,5$ ] oder [ $R_m / 3$ ])

Schweißnaht: Berechnungsspannung  $f = 40 \text{ MPa}$

Daher die mögliche Begründung für die AD2000-W6-1-Beschränkung auf EN AW 6060-T4.

Die kritische Abkühlgeschwindigkeit, oberhalb derer keine Entmischungsvorgänge stattfinden, beträgt für EN AW 6060 ca.  $25^\circ\text{C}$  bis  $60^\circ\text{C}/\text{min}$ , d. h. Teile mit nicht zu dicken Querschnitten können nach dem Schweißen an der Luft abgekühlt werden, ohne dass die geforderten Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften unterschritten werden [10].

EN 13445-8, Tabelle 5.6-1, enthält zusätzlich die hochlegierte AlMgSi-Legierung EN AW **6061-T4** und **EN AW 6061-T6** (nur für Flansche).

EN AW 6061 enthält zusätzliche festigkeitssteigernde Legierungselemente (Mn, Cr, Cu), die bei entsprechender Wärmebehandlung (Glühen, Abschrecken und Warmaushärten) zu hohen Festigkeitswerten ( $R_{p0,2} = 240 \text{ MPa}$ ) führen und somit DN40-Vorschweißflansche überhaupt rechnerisch darstellbar wären.

#### 6061-T4-Eigenschaften (siehe EN 13445-8/EN12392)

Grundwerkstoff:  $R_{p0,2} = 110 \text{ MPa}$ ,  $R_m = 180 \text{ MPa}$

Berechnungsspannung  $f = 60 \text{ MPa}$  (= min [ $R_{p0,2} / 1,5$ ] oder [ $R_m / 3$ ])

6061-T4-Schweißnaht: Berechnungsspannung  $f = 55 \text{ MPa}$  (EN 13445-8, Tabelle 6.2-2)

#### 6061-T6-Eigenschaften (siehe EN 13445-8/EN12392)

Grundwerkstoff:  $R_{p0,2} = 240 \text{ MPa}$ ,  $R_m = 260 \text{ MPa}$

Berechnungsspannung  $f = 87 \text{ MPa}$  (= min [ $R_{p0,2} / 1,5$ ] oder [ $R_m / 3$ ])

6061-T4-Schweißnaht: Berechnungsspannung  $f = 55 \text{ MPa}$  (EN 13445-8, Tabelle 6.2-2)

Allerdings birgt aufgrund der Abschreckempfindlichkeit die schweißtechnische Verarbeitung besonders der 6061-T6-Legierungen erhebliche Risiken (Festigkeits- und Zähigkeitsabfall und Risiko der Mikrorissbildung), siehe hierzu Abschnitt 7.

Bei dieser Legierung ist die Luftabkühlung nach dem Schweißen nicht ausreichend. Es wäre ein (praktisch nicht durchführbares) lokales Abschrecken mit mindestens  $1.000^\circ\text{C}/\text{min}$  erforderlich, damit keine Entmischungsvorgänge stattfinden, mit der Folge von deutlichen Einbußen bei den Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften in der Schweißnaht und der Wärmeeinflusszone [10].

Die hochfeste Legierung EN AW 6061 (AlMg1SiCu) wurde ursprünglich in den USA entwickelt. In Europa dafür die hochfeste Legierung EN AW 6082 (AlSi1MgMn), welche auch für Luftverdampfer-Vorschweißflansche verwendet wird. Die Legierung EN AW 6082 ist in AD2000-HP0, Tabelle 2a, aufgeführt. In den Verweisen – VdTÜV Werkstoffblätter 423 und 493 – steht der Vermerk „Schweißen nicht vorgesehen“.

#### Zähigkeitsanforderungen

Gemäß EN 13445-8 betragen die Mindestwerte für die Bruchdehnung 14 % für Bauteile, die einer Kaltverformung unterzogen werden, und 10 % für Bauteile, die keiner Kaltverformung unterzogen werden.

Es wird empfohlen, wie im AD2000-W6-1 vorgesehen, grundsätzlich ausschließlich Werkstoffe mit einer Bruchdehnung von mindestens 14 % zu verwenden (Begründung: zusätzliche Lasten, wie z. B. Eisbelastung, Wind- und Erdbebenlasten).

Für Druckaufbauverdampfer werden seit Mitte der 1970er Jahre gebogene („zweiflossige“) Flossenrohre aus dem Werkstoff 6060-T4 eingesetzt. In Europa wurden damit mehr als 20.000 Kaltvergaser ausgerüstet. Schadensfälle sind nicht bekannt und somit gilt diese Konstruktion als betriebsbewährt. Allerdings sind die gebogenen Flossenrohre gemäß den Normen EN13445-8 und EN13480-8 nicht mehr zulässig und widersprechen demnach den gemachten positiven Erfahrungen. Beim Biegen von zweiflossigen Flossenrohren ist sicherzustellen, dass nach dem Umformen eine Restbruchdehnung von  $\geq 10\%$  eingehalten wird. Der Nachweis hierüber hat durch den Hersteller zu erfolgen.

#### Prüfungen am Halbzeug (Rohre und Hohlprofile) gemäß AD2000-W6-1

Es wird empfohlen, die Prüfungen am Halbzeug (Rohre und Hohlprofile) gemäß AD2000-W6-1, Abschnitt 5, vom Werkstoffhersteller durchführen zu lassen. Insbesondere die Ringversuche an Strangpressprofilen sind wegen Schadensfällen (Längsrisse) im Rippenrohr infolge von Werkstoffungängen durch den Strangpressvorgang wichtig.

#### **Fazit Werkstoffe:**

- Es sollten ausschließlich Werkstoffe mit einer Bruchdehnung von mindestens 14 % verwendet werden.
- Niedriglegierte Aluminiumwerkstoffe des Typs Al-Mg-Si, wie z. B. 6060-T4 oder 6063-T4, sind zu bevorzugen.
- Der Werkstoffhersteller sollte Prüfungen am Halbzeug durchführen, zusätzlich im Umfang des AD2000-W6-1.

## **6. Berechnung**

### 6.1 Drucktragende Teile

Die rechnerische Mindestwanddicke für PN40/DN20/DN25-Rohre aus den zulässigen Werkstoffen beträgt etwa 1 mm.

Die berechneten Wanddicken bei Luftverdampferteilen sollten allerdings aus konstruktiven und fertigungstechnischen Gründen (Biegen, Schweißen, Prüfen, besondere Belastungen) überdimensioniert werden.

Gemäß AD2000-B1 beträgt die Mindestwanddicke ( $s_{min}$ ) für Aluminium-Zylinderschalen  $s_{min} = 3,0$  mm. DN20/DN25-Rohre sollten daher eine Mindestwanddicke von  $s_{min} = 3,0$  mm haben [21]. Größere Rohrdurchmesser sollten mit jeweils vergrößerten Wanddicken ausgeführt werden. Falls erforderlich, sind Rohreinschweißungen in größeren Sammelrohren mit Stützen zu verstärken.

### 6.2 Standsicherheitsnachweis

Die Berechnung ist vom Hersteller nach EN 13445-3 oder gemäß den Normen des EUROCODES [11] mit den deutschen nationalen Anhängen für die statische Auslegung und Berechnung (Widerstand von Verdampfer, Anschlüssen, Füßen, Schweißnähten, Fußplatte...) durchzuführen. (EN 1990 für allgemeine Lasten, EN 1991 für Windlasten, EN 1993 für die Auslegung und Herstellung von Stahlkonstruktionen, EN 1998 für Erdbebengefährdung, EN 1999 für die Auslegung und Herstellung von Aluminiumkonstruktionen).

Folgende Belastungen/Einwirkungen sind zu berücksichtigen:

- Eigengewicht und Eislasten  
Aktuelle Auslegungen erfolgen mit einer Eislast von ca. 1/3 des Luftverdampfer volumens Länge x Breite x Höhe. Dies ist in Einzelfällen ggf. nicht ausreichend.
- Erdbebenlasten
- Windlasten

Die tragende Struktur eines Luftverdampfers wird wesentlich von der Haltbarkeit und Flexibilität der geklammerten Verbindungen (Crimpungen) der Rippenrohre untereinander und mit den Tragelementen des Verdampfers bestimmt.

#### Fazit Berechnungen:

- Rohre mit dem Nenndurchmesser DN 20/25 sollten eine Mindestwanddicke von 3,0 mm haben.
- Bei größerer Nennweite ist die Wandstärke entsprechend anzupassen.
- ALLE Kräfteinwirkungen auf den Verdampfer, insbesondere auch zyklische Biegebeanspruchungen infolge von thermischen Ausdehnungen und Schrumpfungen und Eislasten, sind zu berücksichtigen.
- Crimpverbindungen sind durch die statische Überbestimmtheit des Systems „Verdampfer“ als kritisch einzustufen, vor allem bei großen, diskontinuierlich betriebenen Verdampfern.
- Crimpverbindungen sind in den EUROCODE-Normen für Standsicherheitsnachweise nicht enthalten [11].

## 7. Schweißen von Luftverdampfer-Aluminiumlegierungen

Im Aluminium-Druckbehälterbau werden üblicherweise die nicht wärmebehandelbaren Aluminiumlegierungen der Werkstoffgruppe 22 gemäß CEN ISO/TR 15608 [12], z. B. Legierungen mit der Nummern 5xxx (z. B. 5083 – ALMg4,5Mn) eingesetzt. Diese Legierungen können artgleich mit einem Schweißzusatzwerkstoff mit der gleichen Grundzusammensetzung wie der Grundwerkstoff geschweißt werden.

Rippenrohrprofile für Luftverdampfer können durch Strangpressen nur aus AlMgSi-Legierungen hergestellt werden, den Legierungen mit den Nummern 6xxx.

Die Metallurgie dieser aushärtbaren Legierungen der Werkstoffgruppe 23.1 gemäß CEN ISO/TR 15608, (z. B. 6060 (AlMgSi); 6061 (AlMg1SiCu)) ist komplexer. Diese Legierungen sind sehr viel empfindlicher für interkristalline Risse, Rissbildung während der Abkühlphase der Schweißnaht:

1. Die Legierungen der Serie 6xxx sind anfällig für Erstarrungsrisse („Solidification Cracking“), wenn die Schweißgutzusammensetzung nahe an der Grundwerkstoffzusammensetzung bleibt. Diese Legierungen dürfen nur mit V- oder Y-Nähten geschweißt werden, damit sich ein Überschuss an Zusatzwerkstoff am gesamten Schweißgut bilden kann. Für die Legierung 6061 sollte das Schweißgut zu mindestens 70 % aus dem artfremden Schweißzusatzwerkstoff AlMg 5/ER 5356 (3.3556) bestehen [13]. Schweißzusatzwerkstoffe vom Typ AlSi 5/ER 4043 (3.2245) oder ähnlich sollten aufgrund der nicht ausreichenden Zähigkeits- und Dehnbarkeitseigenschaften für Druckbehälter nicht verwendet werden.



2. Besonders die hochlegierten und hochfesten Legierungen 6061-T6 und 6082-T6 neigen aufgrund ihrer Abschreckempfindlichkeit zu Aufschmelzungsrissen („Liquation Cracking“). An den Korngrenzen in der Wärmeeinflusszone bilden sich Bestandteile (Phasen) mit niedrigem Schmelzpunkt, die beim Wiederaufschmelzen zu mikroskopischen Korngrenzentrennungen, Mikro- und Makrorissen führen können, speziell beim Vorhandensein von inneren oder äußeren Zugspannungen [14].

**Während der Fertigung unerkannt gebliebene Aufschmelzungsrisse können zu spontanen Abbrüchen von Vorschweißflanschen führen.**

Unzulässige Mikro- und Makrorisse befinden sich bei mehrlagigem Schweißen an der inneren Wandung der Rohrschweißnaht und sind bei kleinen Wanddicken in der Durchstrahlungsprüfung oftmals nicht als solche zu erkennen. Oberflächen-Rissprüfungen der äußeren Schweißnaht, wie in EN 13445-8 vorgesehen, wären somit unzureichend.

Es ist zu beachten, dass das **Reparaturschweißen**, vor allem der hochfesten aushärtbaren Legierungen 6xxx, zu einer weiteren Herabsetzung der Festigkeit der Schweißnaht im Vergleich zur ursprünglichen Schweißnahtfestigkeit führen kann. Wegen der mikrostrukturellen Gefügeveränderungen, die bei der ursprünglichen Schweißung stattfinden, und der bei Reparaturen größeren Eigenspannungen kann die Neigung zur Heißrissbildung in der Wärmeeinflusszone (WEZ) oder im zuvor eingebrachten Schweißgut bei Reparaturschweißungen noch größer sein [13].

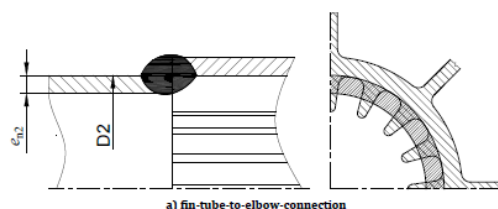
Abhilfemaßnahmen [14]:

- Verwendung möglichst nur von niedriglegierten Legierungen des Typs Al-Mg-Si mit kleinster Abschreckempfindlichkeit, z. B. 6060 oder 6063 (amerikanische Variante von 6060).
- Vermeidung von Zugspannungen während des Schweißens. Keine Verwendung von mechanisierten Schweißverfahren mit eingespannten Teilen! Kein Einschlagen und damit Einspannen von 180°-Rohrbögen in die Rippenrohre von vorgefertigten Rippenrohrpaketen!
- Angemessener Umfang von zerstörungsfreien und zerstörenden Prüfungen (Arbeitsprüfungen). Zähigkeit und Dehnbarkeit der Schweißnähte der hochfesten Legierungen 6061 und 6082 können insbesondere bei -196°C unterhalb der Mindestanforderungen liegen [15].

Beispiele für Arten der Schweißnahtvorbereitung von Aluminiumlegierungen sind in **EN ISO 9692-3** vorgegeben [16].

Empfehlungen für das Schweißen von Aluminiumlegierungen sind in **EN 1011-4** [17] enthalten, u. a. mit Hinweisen für geeignete Schweißzusatzwerkstoffe und Hinweisen für die Vermeidung von Schweißnahtfehlern.

Eine Schweißnahtfugenform wird seit vielen Jahren für die Verbindung von 180°-Rohrbögen mit den Rippenrohren praktiziert, obwohl diese Fugenform nicht in den o. a. Normen enthalten ist:



Im (inzwischen zurückgezogenen) Normentwurf EN 13445-8:2020/FprA1:2020 [18] steht der Hinweis: Nicht für Ermüdungsbeanspruchungen.

Bei Gasdruckprüfungen wäre diese Stumpfnahat gemäß EN 13480-8 und BG-Merkblatt T039 einer 10 %-Durchstrahlungsprüfung zu unterziehen.

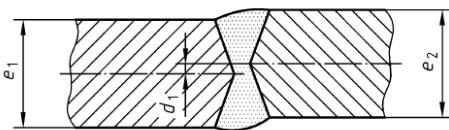
Da diese Schweißnaht so nicht prüfbar ist, wäre sie demnach nicht zulässig.

Vornehmlich bei der Verwendung von hochfesten Legierungen der 6xxx Gruppe für Rippenrohre und dem erhöhten Risiko der Mikrorissbildung ist von dieser Fugenform abzuraten.

**Bei dieser Fugenform handelt es sich um eine Stumpfnahat mit unzulässigem Mittellinienversatz  $d_1 = 3,0$  mm (= der Wanddicke von 3,0 mm).**

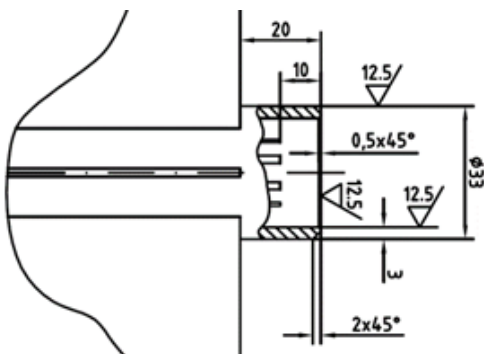
Der **zulässige Mittellinienversatz  $d_1$**  gemäß EN 13445-8/Verweis auf EN 13445-4, Abschnitt 5.2, bei einer Wanddicke von 3,0 mm beträgt:

$$d_1 \leq 0,75 \text{ mm}$$

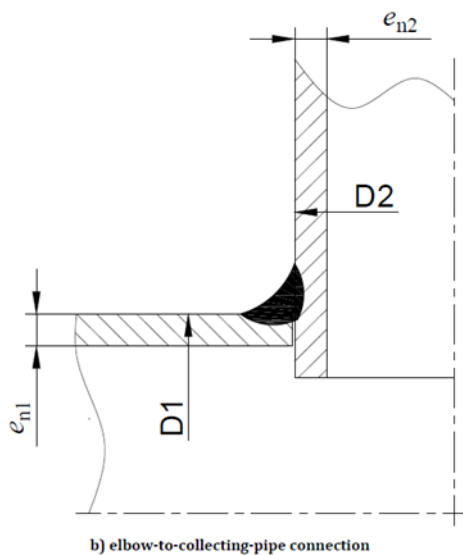


a) Mittellinienversatz  $d_1$  bei gleicher Wanddicke  $e_1 = e_2$

Beispiel für eine prüffähige (Durchstrahlung) Stumpfnahat der Rippenrohre von Luftverdampfern:



Eine weitere Schweißnahtfugenform wird seit vielen Jahren für die Kehlnahtverbindung von eingesteckten Rohren in Sammelrohren verwendet:



Auch hier gilt der Hinweis aus dem (inzwischen zurückgezogenen) Normentwurf EN 13445-8:2020/FprA1:2020 [18]: **Nicht für Ermüdungsbeanspruchungen.**

Das eingesteckte Rohr D2 trägt nicht zur Ausschnittsverstärkung des Ausschnittes D2 im Rohr D1 bei. Die Wanddicke  $e_{n1}$  gemäß obiger Zeichnung ist so groß zu wählen, dass eine Ausschnittsverstärkung nicht erforderlich ist.

Einige Hersteller verstärken die Ausschnitte in Sammelrohren größerer Durchmesser mit aufgesetzten Stutzen mit angedrehter Badsicherung (zusätzliche Schweißnaht erforderlich).

#### Fazit Schweißverbindungen:

- Die hochlegierten Werkstoffe 6061-T6 und 6082-T6 sind für Schweißverbindungen ohne erhebliche zusätzliche Maßnahmen ungeeignet.
- Werkstoffe der Reihe 6060 und 6063 sind für Schweißungen besser geeignet.
- Einspannen (Fixieren) von Teilen beim Schweißen sollte vermieden werden.
- Das Einschweißen von z. B. 180°-Verbindungsrohren in Strangpressprofile bedarf besonderer Maßnahmen und Nachweisen infolge des Mittellinienversatzes.
- Der Hersteller hat die ausreichende Dimensionierung der Ausschnitte in Sammelrohren nachzuweisen.

#### 8. Prüfungen während der Herstellung

Zerstörungsfreie Prüfungen und zerstörende Prüfungen (Arbeitsprüfungen) sind in EN 13445-8 geregelt.

## 8.1 Zerstörungsfreie Prüfungen

EN 13445-8, Tabellen 8-2.1 sowie 8.3-1 und Abschnitt 8.7

Bei Gasdruckprüfungen mit dem 1,1-fachen zulässigen Betriebsdruck sind 10 % der Stumpfnähte (Rundnähte) einer volumetrischen Prüfung (Durchstrahlung) zu unterziehen und alle anderen Nähte einer 100 % Oberflächen-Rissprüfung. Die Zulässigkeitskriterien entsprechen EN ISO 10042 [19]. Bewertungsgruppe B(C) und den entsprechenden übertragenen Zulässigkeitskriterien in den speziellen ZfP-Verfahrensnormen EN ISO 10675-2 (Durchstrahlung) und EN ISO 23277 (Oberflächen-Rissprüfung).

## 8.2 Arbeitsprüfungen

EN 13445-8, Tabellen 8-2.1 und Abschnitt 7.9

Gemäß EN 13445-8, Tabelle 8.2-1 – Prüfgruppen für Druckbehälter aus Aluminium, ist für die Prüfgruppe 3 für nahtlose Rohre der Werkstoffgruppe 23.1 (AlMgSi - 6xxx) der **Schweißnahtfaktor 0,85** vorgesehen. Gemäß EN 13445-8, Abschnitt 7.9, wären für Luftverdampfer somit keine Arbeitsprüfungen erforderlich!

### Empfehlungen:

Für starre Luftverdampferkonstruktionen aus mikrorissempefindlichen Legierungen der Gruppe 6xxx reichen die Normanforderungen der EN 13445-8 ggf. nicht aus. Die neue Ausgabe der DIN EN ISO 10042-2019-02 enthält erstmalig quantitative Kriterien für die Zulässigkeit von Mikrorissen (Fehlerart 1001), „Risse, die üblicherweise nur unter dem Mikroskop ( $\times 50$ ) sichtbar sind“.

### Zulässigkeitskriterium:

„max. 0,4 mm  $\times$  0,01 mm, aber max. 3 Unregelmäßigkeiten je 2,0 mm  $\times$  2,0 mm“

Die EN 13445-8 lässt die mikrorissempefindlichen Legierungen zu. Es fehlen aber die Prüfvorgaben, um diese Mikrorisse während der Fertigung zu erkennen und ggf. auszubessern.

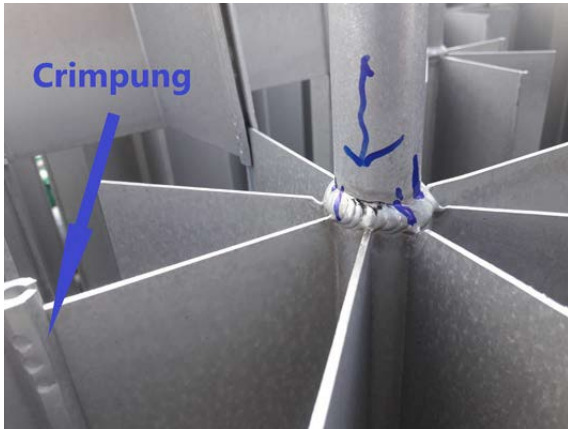
### **Fazit Prüfungen:**

- Angemessener Umfang von zerstörungsfreien und zerstörenden Prüfungen (Arbeitsprüfungen).
- Aus der laufenden Produktion der Luftverdampfer sollten in regelmäßigen Zeitabständen Proben von Schweißnähten entnommen und mit Mikroschliffen auf Rissfreiheit geprüft werden.

## 9. Verbindungen (Crimpungen) von Rippenrohren untereinander und mit tragenden Bauteilen

Seit ca. 20 Jahren besitzen Aluminium-Luftverdampfer kein separates äußeres Traggestell oder eine Rahmenkonstruktionen mehr, welche die Lasten aus Transport, Aufstellung und Betrieb (Eigengewicht, Eislasten, Wind- und Erdbeben) aufnehmen (siehe auch IGV-SH-03B-Rev0).

Alle Hersteller in Europa verwenden seit ca. dem Jahr 2000 zur Verbindung der Rippenrohren untereinander und mit den tragenden Bauteilen spezielle Klammerprofile, die mit Crimpungen mit den Rippenenden der Rippenrohre unter plastischer Verformung der Klammer mit dem Rippenende verbunden werden.



Die Rippenrohre sind in zwei oder drei Ebenen (unten, mittig, oben) untereinander formschlüssig durch gecrimpte Klammern an den Rippenenden mehrfach verbunden. Diese Konstruktion ist bei ungleichmäßig verteilten thermischen Schrumpfungen und Ausdehnungen der Rippenrohre zwischen der kalten Zulaufseite und den nachgeschalteten wärmeren Bereichen statisch überbestimmt (zwei oder drei Festlager).

Der obere Tragrahmen, an denen sich die Kranösen befinden, ist somit mit dem Luftverdampfer nur durch gecrimpte Klammern verbunden. Diese Verbindung kann nach längerer Betriebsdauer erhebliche Sicherheitsmängel aufweisen. Durch die zyklischen thermischen Schrumpfungen und Ausdehnungen der Rippenrohre kann es zu Überbeanspruchungen dieser gecrimpten Verbindungen kommen. Sie lösen sich im Laufe der Betriebsdauer oder reißen ein.

1. Durch das Lösen oder Einreißen dieser gecrimpten Verbindungen hat der Verdampfer keine ausreichend feste Verbindung mit dem Tragrahmen mehr. Beim Anheben des Verdampfers mit dem Kran kann sich dieser Rahmen komplett ablösen und der Verdampfer kann herunterfallen.
2. Durch die zyklischen thermischen Schrumpfungen und Ausdehnungen kann es durch wechselnde Biegebelastung zu dynamischen Überlastungen der Schweißnähte der Rohrbögen mit den Rippenrohren kommen, was während des Betriebes zu Anrissen in der Schweißnaht oder sogar zu Abrissen führen kann. In ungünstigen Fällen, bei diskontinuierlich betriebenen Großverdampfern (Rippenrohrlänge ab ca. 6 m), mit starren Klammerprofilen, treten Schäden (Totalschäden) schon nach wenigen Betriebsjahren auf.

#### Schlussfolgerung:

In den Regelwerken und Normen zur Herstellung von Druckbehältern oder Tragwerken ist die Verbindung von strukturellen Teilen mit Crimpungen nicht beschrieben, es besteht allerdings ein Risiko für die Standsicherheit bei nicht dauerhaft haltbaren Crimpungen. Für die Crimpungen und die erforderliche Haltbarkeit, Nachgiebigkeit und Flexibilität der Klammerprofile bei zyklischen Längenänderungen der Rippenrohre existieren keine normativen Vorgaben.

#### Empfehlung:

Der Hinweis aus AD2000 HP 5-1 [20] für besondere Verbindungen wird sinngemäß angewendet:

Für die mechanische Verbindung von Rippenrohren untereinander und mit den tragenden Rahmen und Fußkonstruktionen durch Crimpungen sind die arbeitstechnischen Grundsätze zwischen Hersteller, Betreiber/Besteller und der zuständigen unabhängigen Stelle zu vereinbaren.

#### **Fazit Crimpungen:**

- Aufgrund von statischer Überbestimmtheit sind Crimpungen nicht für alle Verbindungen geeignet und bergen hohe Risiken.
- Zumindest die tragende Struktur des Verdampfers, die auch Hebevorrichtungen beinhaltet, sollte konstruktiv anders gelöst werden.
- Für die mechanische Verbindung von Rippenrohren untereinander und mit den tragenden Rahmen und Fußkonstruktionen durch Crimpungen sind die arbeitstechnischen Grundsätze zwischen Hersteller, Betreiber/Besteller und der zuständigen unabhängigen Stelle zu vereinbaren.

## **10. Wiederkehrende Prüfungen**

Gemäß BetrSichV Anhang 2, Abschnitt 4, Nr. 7.14 (e):

Für „Druckbehälter zum Verdampfen von Gasen oder Gasgemischen, die auf die drucktragende Wandung keine korrodierende Wirkung haben und die ausschließlich aus Rohranordnungen bestehen“, entfallen für Luftverdampfer periodische innere Prüfungen und Festigkeitsprüfungen. Wiederkehrende innere Prüfungen und Festigkeitsprüfungen sind nur nach Instandsetzungsarbeiten (Reparaturen der drucktragenden Teile) durch befähigte Personen durchzuführen (siehe Anhang).

Allerdings wird in Deutschland von IGV-Mitgliedsunternehmen an einer alten Regelung der Druckbehälterverordnung (DruckBehV) festgehalten.

Luftverdampfer wurden unabhängig von Druck und Inhalt der Prüfgruppe II zugeordnet, mit der Festlegung der Prüffrist durch den Betreiber. Es hat sich bewährt, nach Aufarbeitungen (= Wartungen) im Aufarbeitungswerk Luftverdampfer einer Gasdruckprüfung zu unterziehen und hierüber eine Bescheinigung auszustellen.

Bei der Durchführung einer Gasdruckprüfung in Deutschland ist das BG-Merkblatt T039, Abschnitt 5.1.2.2, Gasdruckprüfung bei wiederkehrenden Prüfungen, zu beachten.

Voraussetzungen für die sichere Durchführung der Gasdruckprüfung sind u. a.:

- zähe Werkstoffe – Vermeidung von Sprödbruch
- 10 % Durchstrahlungsprüfung der Rundnähte
- bei besonderen Schädigungsmechanismen zusätzliche gezielte zerstörungsfreie Prüfungen durchführen

#### Schlussfolgerung:

Bei ungünstigen starren Verdampferkonstruktionen aus hochfesten 6xxx-Legierungen und mit nicht durchstrahlbaren Stumpfnähten können diese Voraussetzungen ggf. nicht vollumfänglich erfüllt werden.

**Fazit wiederkehrende Prüfungen:**

- Verdampfer sollten nach Instandsetzungsarbeiten einer Gasdruckprüfung unterzogen werden.
- Verdampfer aus hochfesten Aluminiumlegierungen, die außerdem noch ungünstig starr konstruiert wurden (Crimpungen), erfüllen unter Umständen nicht die Anforderung für eine Gasdruckprüfung.

**11. Zusammenfassung**

Dieses Positionspapier wurde aufgrund von Schadensfällen bei in Betrieb befindlichen Gasversorgungsanlagen in den letzten Jahren erstellt. Es werden die konstruktiven und schweißtechnischen Ursachen und Risiken beschrieben. Die Vorgaben in der harmonisierten Norm EN 13445-8 für Aluminiumdruckbehälter reichen ggf. für Luftverdampfer nicht aus. Ergänzende Anforderungen für die Spezifizierung und Beschaffung von Luftverdampfern werden empfohlen.

Zusätzlich sollte die harmonisierte Aluminium-Rohrleitungsnorm EN 13480-8 mitberücksichtigt werden, da die Luftverdampfer ausschließlich aus Rohranordnungen bestehen (z. B. für Rohrbiegevorgaben, Einsteckschweißverbindungen).

Die aus den einzelnen Kapiteln gezogenen Fazite sind hier nochmals aufgelistet:

**Fazit Werkstoffe:**

- Es sollten ausschließlich Werkstoffe mit einer Bruchdehnung von mindestens 14 % verwendet werden.
- Niedriglegierte Aluminiumwerkstoffe des Typs Al-Mg-Si, wie z. B. 6060-T4 oder 6063-T4, sind zu bevorzugen.
- Der Werkstoffhersteller sollte Prüfungen am Halbzeug durchführen, zusätzlich im Umfang des AD2000-W6-1.

**Fazit Berechnungen:**

- Rohre mit dem Nenndurchmesser DN 20/25 sollten eine Mindestwanddicke von 3,0 mm haben.
- Bei größerer Nennweite ist die Wandstärke entsprechend anzupassen.
- ALLE Krafteinwirkungen auf den Verdampfer, insbesondere auch zyklische Biegebeanspruchungen infolge von thermischen Ausdehnungen und Schrumpfungen und Eislasten, sind zu berücksichtigen.
- Crimpverbindungen sind durch die statische Überbestimmtheit des Systems „Verdampfer“ als kritisch einzustufen, vor allem bei großen, diskontinuierlich betriebenen Verdampfern.
- Crimpverbindungen sind in den EUROCODE-Normen für Standsicherheitsnachweise nicht enthalten [11].

**Fazit Schweißverbindungen:**

- Die hochlegierten Werkstoffe 6061-T6 und 6082-T6 sind für Schweißverbindungen ohne erhebliche zusätzliche Maßnahmen ungeeignet.
- Werkstoffe der Reihe 6060 und 6063 sind für Schweißungen besser geeignet.
- Einspannen (Fixieren) von Teilen beim Schweißen sollte vermieden werden.
- Das Einschweißen von z. B. 180°-Verbindungsrohren in Strangpressprofile bedarf besonderer Maßnahmen und Nachweisen infolge des Mittellinierversatzes.
- Der Hersteller hat die ausreichende Dimensionierung der Ausschnitte in Sammelrohren nachzuweisen.

**Fazit Prüfungen:**

- Angemessener Umfang von zerstörungsfreien und zerstörenden Prüfungen (Arbeitsprüfungen).
- Aus der laufenden Produktion der Luftverdampfer sollten in regelmäßigen Zeitabständen Proben von Schweißnähten entnommen und mit Mikroschliffen auf Rissfreiheit geprüft werden.

**Fazit Crimpungen:**

- Aufgrund von statischer Überbestimmtheit sind Crimpungen nicht für alle Verbindungen geeignet und bergen hohe Risiken.
- Zumindest die tragende Struktur des Verdampfers, die auch Hebevorrichtungen beinhaltet, sollte konstruktiv anders gelöst werden.
- Für die mechanische Verbindung von Rippenrohren untereinander und mit den tragenden Rahmen und Fußkonstruktionen durch Crimpungen sind die arbeitstechnischen Grundsätze zwischen Hersteller, Betreiber/Besteller und der zuständigen unabhängigen Stelle zu vereinbaren.

**Fazit wiederkehrende Prüfungen:**

- Verdampfer sollten nach Instandsetzungsarbeiten einer Gasdruckprüfung unterzogen werden.
- Verdampfer aus hochfesten Aluminiumlegierungen, die außerdem noch ungünstig starr konstruiert wurden (Crimpungen), erfüllen unter Umständen nicht die Anforderung für eine Gasdruckprüfung.



## Anhang

### Anforderungen und Vorgehensweise bei Instandsetzungsarbeiten von Rissen an Aluminium-Luftverdampferschweißnähten

Bei Aluminium-Luftverdampfern kann es durch wechselnde Biegebelastung infolge von zyklischen thermischen Schrumpfungen und Ausdehnungen zu dynamischen Überlastungen der Schweißnähte der Rohrbögen mit den Rippenrohren kommen, was während des Betriebes zu Anrissen in der Schweißnaht führen kann.

Der Arbeitgeber/Betreiber steht vor der Aufgabe, diese Risse ggf. kurzfristig zu reparieren oder den Verdampfer auszutauschen, um die Kundenversorgung sicherzustellen.

Aufgrund der Vielfalt an Luftverdampferkonstruktionen, den eingesetzten Werkstoffen und den Schweißnahtfugenformen können an dieser Stelle nur allgemeine Hinweise gegeben werden. Oftmals sind in der Luftverdampferdokumentation keine Werkstoffzeugnisse und Schweißnahtfugenformen mit Schweißanweisungen enthalten.

Zur Durchführung einer ordnungsgemäßen Reparatur sind gültige Schweißer- und ggf. Verfahrensprüfungen erforderlich.

#### 1. Grundsätzliche Anmerkungen

Die Eigenschaften der Schweißnähte von Aluminiumlegierungen unterscheiden sich grundsätzlich von Edelstahlschweißnähten, insbesondere bei den Schweißnähten der hochfesten Legierungen 6061-T6 und 6082-T6 werden die Mindesteigenschaften des Grundwerkstoffes (Festigkeit, Zähigkeit, Dehnbarkeit) nicht erreicht.

Beim Reparaturschweißen insbesondere der hochfesten und hochlegierten Legierungen 6061 und 6082 verschlechtern sich die mechanisch technologischen Eigenschaften nochmals.

In der Abkühlphase des Schweißvorganges und beim Vorliegen von Eigenspannungen kann es aufgrund von niedrigschmelzenden Bestandteilen auf den Korngrenzen der Wärmeeinflusszone zur Heißrissbildung kommen.

Alle bei Luftverdampfern verwendeten AlMgSi-Legierungen (6060, 6061, 6063, 6082) müssen mit einem artfremden Zusatzwerkstoff vom Typ AlMg5 geschweißt werden. Bei einem artgleichen Schweißzusatz (wie bei austenitischem Edelstahl üblich) besteht das unmittelbare Risiko der Heißrissbildung (Erstarrungsrisse) beim Schweißen.

Bei V- oder Y-Schweißnähten von AlMgSi-Legierungen sollte zur Vermeidung von Heißrissen ein Aufmischungsgrad von ca. 70 % erreicht werden. I-Schweißnähte wie bei austenitischem Edelstahl sollten vermieden werden. Rohre von Aluminium-Luftverdampfern sind in der Regel überdimensioniert.

Beispiel: Rippenrohr EN AW 6060 mit drucktragendem Rohr  $d_a = 30\text{ mm} \times s = 3,0\text{ mm}$ .  
Berechnungskennwert  $K/1,5 = 40\text{ MPa}$ .  $P_s = 40\text{ bar}$

Erforderliche Wanddicke  $ser_f$ :  $ser_f = (d_a \times P_s) / (20 K/1,5 + P_s)$  (Formel (2) AD2000-B1) [21]  
 $ser_f = 30 \times 40 / (20 \times 40) + 40 = 1,43\text{ mm}$

Das Rippenrohr ist somit hinsichtlich der Druckbeanspruchung in der Regel mehr als 2-fach überdimensioniert.

## **2. Vorgehensweise bei Reparaturen von Rissen an Aluminium-Luftverdampferschweißnähten, Risse an Schweißnähten zwischen Rippenrohr und 180° Rohrbogen**

Wird bei einem Luftverdampfer ein Anriss festgestellt, wären folgende Vorgehensweisen praktikabel:

### **2.1 Sofortiger Austausch des Luftverdampfers gegen einen Ersatzverdampfer**

- Verschrotten des schadhaften Verdampfers
- ggf. Rücksendung des schadhaften Verdampfers zum Hersteller oder in ein Aufarbeitungswerk
- Zur Durchführung einer ordnungsgemäßen Reparatur sind geeignete Ersatzteile erforderlich.
- Bei nicht ausreichenden technischen Unterlagen des Luftverdampfers sollte ggf. der Hersteller kontaktiert werden.

### **2.2 Reparaturschweißen vor Ort in der Kundenanlage, temporärer Weiterbetrieb zur Sicherstellung der Kundenversorgung und Austausch des Luftverdampfers, sobald Ersatzequipment zur Verfügung steht**

Die BetrSichV verlangt vom Arbeitgeber/Betreiber in diesem Fall eine Instandhaltungsanweisung zur Durchführung der Reparatur. Da wichtige Informationen häufig nicht vorliegen (Schweißnahtfugenform, Grundwerkstoffe, verwendete Schweißzusatzwerkstoffe bei der Herstellung) kann nur eine temporäre Reparatur vorgenommen werden.

Die gerissene Schweißnaht sollte herausgetrennt werden, bei der hochfesten Legierung 6061 mindestens 50 – 100 mm beiderseits der Schweißnaht.

Nach der Reparatur sollte die Schweißnaht einer Durchstrahlungsprüfung unterzogen werden. Dies ist bei Luftverdampfern der meisten Hersteller allerdings nicht möglich, die Rohrbögen sind direkt an das Rippenrohr geschweißt, so dass kein Röntgenfilm angelegt werden kann. Die ordnungsmäßige Durchschweißung und Wurzelbildung kann somit nicht geprüft werden.

Besteht das Risiko von betriebsbedingten Schäden, verlangt das BG-Merkblatt T039, 5.1.2.2, vor einer Gasdruckprüfung zusätzlich eine 10 % Durchstrahlungsprüfung aller Rundnähte. Auch dies wäre dann nicht möglich.

Die Gasdruckprüfung mit  $1,1 \times P_s$  unter Berücksichtigung der o. a. Sachverhalte mit entsprechenden Personenschutzmaßnahmen wird vor Ort durchgeführt und in der Regel bestanden. Die bestandene Gasdruckprüfung ist jedoch kein ausreichender Qualitätsnachweis für einen dauerhaften Weiterbetrieb des betroffenen Verdampfers. Selbst wenn die Rohrwanddicke nur zur Hälfte durchgeschweißt wäre, würde die Gasdruckprüfung bestanden werden. Die reparierte Schweißnaht würde allerdings nach Wochen/Monaten unter der gleichen Betriebsbeanspruchung wieder reißen.

## Referenzen

- [1] Richtlinie 2014/68/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Mai 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung von Druckgeräten auf dem Markt (DGRL)
- [2] Evaluation of the Practical Implementation of the OSH Directives in EU Member States 2015, Version 5, September 2015 – COWI A/S, Parallelvej 2, 2800 Kongens Lyngby, Denmark
- [3] Blue Guide Leitfaden für die Umsetzung der Produktvorschriften der EU 2016  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A52016XC0726%2802%29>
- [4] Richtlinie 2009/104/EG über Mindestvorschriften für Sicherheit und Gesundheitsschutz bei Benutzung von Arbeitsmitteln durch Arbeitnehmer bei der Arbeit  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0104&from=EN>
- [5] Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln (Betriebssicherheitsverordnung – BetrSichV) vom 30.04.2019
- [6] DIN EN 13445-8 Unbefeuerte Druckbehälter – Teil 8: Zusätzliche Anforderungen an Druckbehälter aus Aluminium und Aluminiumlegierungen
- [7] DIN EN 13480-8 Metallische industrielle Rohrleitungen – Teil 8: Zusätzliche Anforderungen an Rohrleitungen aus Aluminium und Aluminiumlegierungen
- [8] BG-Merkblatt T039 Druckprüfungen von Druckbehältern und Rohrleitungen
- [9] AD2000-Merkblatt W6-1 Aluminium und Aluminiumlegierungen – Knetwerkstoffe
- [10] Anwendungstechnologie Aluminium – F. Ostermann – Springer 2014, ISBN 978-3-662-43807-7
- [11] EUROCODE Eurocode-Normen sind grundlegende europäische Normen. EN 1990 – EN 1999 sind als vereinheitlichte Bemessungsregeln im Bauwesen und in der Tragwerksplanung anzuwenden. Sie wurden ab 1. Juli 2012 in Deutschland rechtlich bindend (vorerst mit Ausnahme des EC 6 und 8) eingeführt und sind von den Baubehörden, Bauplanungsbüros und Bauherren einzuhalten.
- [12] CEN ISO/TR 15608 Schweißen – Richtlinien für eine Gruppeneinteilung von metallischen Werkstoffen
- [13] American Welding Society  
AWS Welding Handbook 9thEd vol.5 Materials and Applications-Part 2  
<https://www.aws.org/publications/page/welding-handbook-9th-edition-volume-5>

- [14] American Welding Society  
AWS\_WJ\_1981\_06\_s95 Heat-Affected Zone Cracking of Al-Mg-Si-alloys  
[https://app.aws.org/wj/supplement/WJ\\_1981\\_06\\_s95.pdf](https://app.aws.org/wj/supplement/WJ_1981_06_s95.pdf)
  
- [15] American Welding Society  
AWS\_WJ\_1983\_09\_s243 Tensile and Toughness Properties of Arc-Welded 5083 and 6082 Aluminium Alloys  
[http://files.aws.org/wj/supplement/WJ\\_1983\\_09\\_s243.pdf](http://files.aws.org/wj/supplement/WJ_1983_09_s243.pdf)
  
- [16] DIN EN ISO 9692-3 Schweißen und verwandte Prozesse – Arten der Schweißnahtvorbereitung – Teil 3: Metall-Inertgasschweißen und Wolfram-Inertgasschweißen von Aluminium und Aluminiumlegierungen
  
- [17] DIN EN 1011-4 Schweißen – Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe – Teil 4: Lichtbogenschweißen von Aluminium und Aluminiumlegierungen
  
- [18] EN 13445-8:2020/FprA1:2020 (zurückgezogen); Unbefeuerte Druckbehälter – Teil 8: Zusätzliche Anforderungen an Druckbehälter aus Aluminium und Aluminiumlegierungen
  
- [19] DIN EN ISO 10042 Schweißen – Lichtbogenschweißverbindungen an Aluminium und seinen Legierungen – Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten
  
- [20] AD2000-Merkblatt HP 5/1 – Herstellung und Prüfung der Verbindungen – Arbeitstechnische Grundsätze
  
- [21] AD2000-Merkblatt B1 – Zylinder- und Kugelschalen unter innerem Überdruck