

# **EURISG**

## **European Industrial Sizing Group**

EURISG Sizing Case Report

**ESC\_108**

Stand: **06.12.2017**

Berechnung von Massenstrom und Druckabfall in einer Sicherheitsventil-Abblaseleitung bei der No-tentlastung eines Propylen-Wärmeübertragers bei Unterfeuerung

### **Vertraulichkeit | Nutzung | Haftung**

Dieses Dokument ist erstellt und Eigentum der CSE-Engineering Center of Safety Excellence GmbH. Es ist vertraulich zu behandeln und darf nicht ohne schriftliche Genehmigung der CSE-Engineering und dem Einverständnis der Teilnehmer der EURISG Gruppe an Dritte weitergegeben werden. Dies gilt für die elektronische Weitergabe ebenso wie für eine Kopie des Dokuments. Die Ergebnisse des Dokumentes dürfen ohne schriftliche Genehmigung weder zitiert noch vervielfältigt werden. Jede Haftung für die Vollständigkeit und Richtigkeit des Dokuments wird ausgeschlossen. Es gelten die Compliance Richtlinien der EURISG-Gruppe.

**CSE - ENGINEERING CENTER OF SAFETY EXCELLENCE GMBH MIT SITZ IN PFINZTAL**

GESCHÄFTSFÜHRER:  
Prof. Dr. Jürgen Schmidt  
Prof. Dr. Jens Denecke

HRB NR. 722490  
Amtsgericht Mannheim  
Umsatzsteuer-ID: DE300689965

DEUTSCHE BANK IN NEUSTADT  
IBAN DE41 5467 0024 0033 6164 00  
BIC DEUTDE33HAN30

## Inhaltsverzeichnis

<b>Revisionen.....</b>	<b>2</b>
<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>3</b>
<b>1 Aufgabenstellung .....</b>	<b>6</b>
<b>2 Testdaten und Referenzen .....</b>	<b>10</b>
<b>3 Herangehensweise.....</b>	<b>11</b>
3.1 Verfahrenstechnische Randbedingungen .....	12
3.1.1 Wärmeübertrager.....	12
3.1.2 Sicherheitsventil .....	13
3.1.3 Medium .....	13
3.1.4 Umgebungsbedingungen   Standortdaten.....	14
3.2 Geometrische Abmessungen der Sicherheitsventil-Abblaseleitung .....	15
3.2.1 Wärmeübertrager und Stützen.....	15
3.2.2 Zuleitung .....	15
3.2.3 Sicherheitsventil .....	16
3.2.4 Abblaseleitung .....	16
3.3 Stoffdaten.....	17
3.3.1 Thermodynamisch kritische Daten   reduzierte Daten .....	17
3.3.2 Bewertung der realen Eigenschaften des Propylens .....	19
3.3.3 Stoffdatenmodelle .....	20
3.3.4 Phasenverteilung bei der Notentlastung .....	21
3.4 Auslegungsfall   Sizing Case.....	22
3.5 Auslegungsrechnung .....	23
3.5.1 Festlegung der zu betrachtenden Auslegungsfälle .....	25
3.5.2 Bestimmung des abzuführenden Massenstromes.....	25
3.5.3 Bestimmung des zuerkannten Massenstroms des Sicherheitsventils ...	27
3.5.4 Bestimmung des zuerkannten Massenstroms des Gesamtsystems.....	28
3.5.5 Abführbarer Massenstrom des Gesamtsystems .....	28
3.5.6 Vorgehen bei der Berechnung.....	28
3.5.6.1 Annahmen und Vereinfachungen.....	29
3.5.6.2 Sicherheitsventil .....	30
3.5.6.3 Ausflussziffer.....	31
3.5.6.4 Stützen .....	34
3.5.6.5 Zu- und Abblaseleitung.....	35
3.5.6.6 kontinuierliche Verengung.....	36
3.5.6.7 kontinuierliche Erweiterung.....	37

3.5.6.8	Krümmmer .....	37
3.5.6.9	Lösungsstrategie .....	37
<b>4</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>39</b>
4.1	Abzuführender Massenstrom .....	39
4.2	System Sicherheitsventil-Abblaseleitung .....	39
4.3	Eignung des Sicherheitsventils.....	49
4.4	Vergleich der Berechnungen mit den verschiedenen Ansätzen für Ausflussziffern .....	49
4.5	Zusammenspiel von Brandschutz- und Sicherheitskonzept .....	51
4.6	Vergleich mit Literaturdaten .....	53
<b>5</b>	<b>Lessons learned .....</b>	<b>56</b>
	<b>Literatur .....</b>	<b>59</b>
	<b>Anlagen .....</b>	<b>62</b>
<b>A</b>	<b>Symbole und Einheiten .....</b>	<b>62</b>
<b>B</b>	<b>Modelle für den Rohrreibungsbeiwert .....</b>	<b>66</b>
<b>C</b>	<b>Bestimmung der impulsgemittelten Dichte .....</b>	<b>67</b>
<b>D</b>	<b>Bestimmung der energiegemittelten Dichte.....</b>	<b>67</b>
<b>E</b>	<b>Massenstrom durch das Sicherheitsventil .....</b>	<b>67</b>
<b>F</b>	<b>Berechnung des Wärmeübergangs im Wärmeübertrager .....</b>	<b>68</b>
<b>G</b>	<b>Auslegung eines passenden Sicherheitsventils für den Fall mit Isolierung .....</b>	<b>70</b>
<b>H</b>	<b>Stoffdaten .....</b>	<b>73</b>
<b>I</b>	<b>Numerische Vorgehensweise .....</b>	<b>78</b>
I.1	Zustand bei Abblasebedingungen.....	78
I.2	Initialer Massenstrom .....	78
I.3	Wärmeübertrager - Zustand „0“ .....	79
I.4	Stutzen – Zustandsänderung „0“ – „1“ .....	79
I.5	Zuleitung – Zustandsänderung vertikale gerade Rohrleitung „1“ – „2“	80
I.6	Zuleitung – Zustandsänderung vertikale kontinuierliche Verengung „2“ – „3“ .....	80
I.7	Abblaseleitung – Zustandsänderung horizontale kontinuierliche Erweiterung „out“ – „4“ .....	81

I.8	Abblaseleitung – Zustandsänderung horizontale gerade Rohrleitung „4“ – „5“ und „6“ – „7“ .....	81
I.9	Abblaseleitung – Zustandsänderung im Krümmer „5“ – „6“ .....	82
I.10	Identifikation kritischer Strömung in Rohrleitungen .....	82
I.11	Iterative Berechnung des Massenstroms .....	82
<b>J</b>	<b>Weitere Berechnungsergebnisse .....</b>	<b>83</b>
<b>K</b>	<b>Variantenrechnung .....</b>	<b>85</b>

## 1 Aufgabenstellung

In der chemischen und pharmazeutischen Industrie werden Edukte und Produkte oft mit Wärmeübertragern gekühlt bzw. aufgeheizt. Diese Wärmeübertrager sind in der Regel mit einem Sicherheitsventil gegen einen unzulässigen Überdruck abgesichert. Im Falle eines Feuers in der Anlage wird so beispielsweise der Wärmeübertrager vor einem zu hohen Überdruck geschützt.

Im vorliegenden Fall soll die bestehende Absicherung eines Wärmeübertragers mit Propylen bei Unterfeuerung untersucht werden. Durch eine Entlastung des Propylens soll sichergestellt werden, dass der Wärmeübertrager in der Zeit von 35 min bis zum Greifen des Brandschutzkonzeptes keinen Schaden nehmen kann. Neben der Auslegung des Sicherheitsventils ist daher zu prüfen, ob weitere Sicherheitsmaßnahmen getroffen werden müssen. Das Sicherheitskonzept ist gegebenenfalls an das bestehende Brandschutzkonzept anzupassen.

Der übertragene Wärmestrom der Unterfeuerung wird vom Stahl des Wärmeübertragers sowie von den Phasen Propylen und Kühlwasser aufgenommen. Der Wärmedurchgang kann als ideal angenommen werden. Das instationäre Verhalten des Wärmeübertragers im Verlauf der Entlastung muss bei der Auslegung berücksichtigt werden.

Als Worst-Case Szenario wird angenommen, dass die Ein- und Auslässe des Wärmeübertragers geschlossen sind, und somit keine Durchströmung mehr stattfindet. Bei Betriebsbedingungen liegt das Propylen in der Mantelseite flüssig siedend bei einem Druck von 16 bar g vor. Der Wärmeübertrager ist komplett mit Flüssigkeit gefüllt. Da der Wärmeübertrager als Kühler arbeitet, ist diese Annahme gerechtfertigt, sie stellt den normalen Betriebsfall dar.

Die Rohrseite ist im Betriebszustand mit Kühlwasser bei 3 bar g ebenfalls komplett gefüllt. Die Rohrseite ist kundenseitig mit einem Druck von 45 bar g abgesichert. Die Zu- und Ableitungen zum Wärmeübertrager befinden sich im selben Brandabschnitt wie der Wärmeübertrager selbst.

Die Spezifikationen, die zur Berechnung der Sicherheitsventil-Abblaseleitung benötigt werden, sind in **Tabelle 1** dargestellt. In **Abbildung 1** ist die Anordnung der Einzelelemente wiedergegeben.

### **Tabelle 1:** Eingabegrößen

#### Stoffdaten:

Medium

Propylen

Aggregatzustand bei Betriebsbedingungen:

flüssig siedend

#### Wärmeübertrager:

Bauart:

Rohrbündelwärmeübertrager

Länge Zuleitung zum Wärmeübertrager:

0,8 m, DN80

Länge Ableitung vom Wärmeübertrager:

5 m, DN150

Außenlänge des Wärmeübertragers $L_{WÜ}$ :	3 m
Außendurchmesser des Wärmeübertragers $d_{WÜ}$ :	0,508 m
Isolierung:	keine
Stahlmasse Wärmeübertrager inkl. Leitungen $m_{Stahl}$ :	1700 kg
Außendurchmesser Wärmeübertragerrohre:	25,4 mm
Anzahl Wärmeübertragerrohre:	120

Rohrseite Wärmeübertrager:

Medium	(Kühl-)Wasser
Zustand	flüssig
Druck in der Rohrseite des Wärmeübertragers bei Betriebsbedingungen $p_{op\_Rohr}$ :	3 bar g
Masse Kühlwasser im Wärmeübertrager und Zu- und Ableitung $m_{KW}$ :	160 kg
Mittlere Kühlwassertemperatur im Betrieb $T_{op\_Rohr}$ :	32 °C
Maximal zulässiger Betriebsdruck Rohrseite:	45 bar g
Maximal zulässige Betriebstemperatur Rohrseite:	120 °C
Die Rohrseite des Wärmeübertragers ist mit einer geeigneten Schutzeinrichtung abgesichert (Sicherheitsventil mit einem Ansprechdruck von 45 bar g, analog zu dem zu prüfenden Ventil).	

Mantelseite Wärmeübertrager:

Medium	Propylen
Zustand bei Betriebsbedingungen $T_{op\_Mantel}$ :	flüssig siedend
Druck bei Betriebsbedingungen $p_{op\_Mantel}$ :	16 bar g
Propylenmasse Wärmeübertrager inkl. Zu- und Ableitung zum Wärmeübertrager $m_{Prop}$ :	160 kg
Maximal zulässiger Betriebsdruck Mantelseite:	45 bar g
Maximal zulässige Betriebstemperatur Mantelseite:	120 °C

Zu- und Abblaseleitung:

Druckverlustbeiwert für den Stutzen am Wärmeübertrager $\zeta$ :	0,57
Nennweite Zuleitung $d_{1,2}$ :	DN50
Länge Zuleitung $L_{1,2}$ :	1000 mm
Länge stetige Verengung DN50/25 $L_{2,in}$ :	100 mm
Ausrichtung der gesamten Zuleitung:	vertikal
Länge stetige Erweiterung DN50/100 $L_{out,3}$ :	100 mm
Nennweite Abblaseleitung $d_{3,4}$ und $d_{5,6}$ :	DN100
Winkel Krümmer $Kr_1$ :	90°
Verhältnis Krümmungsradius zu Durchmesser $Kr_1$ :	3,15
Länge der Abblaseleitung $L_{3,4}$ :	676 mm
Länge der Abblaseleitung $L_{5,6}$ :	4347 mm
Ausrichtung der gesamten Abblaseleitung:	horizontal
Rohrrauigkeit $k$ :	$3 \cdot 10^{-4}$ m

Material Wärmeübertrager, Zu- und Ableitung, Zu- und Abblaseleitung:

unlegierter Stahl, EN P235 TR2 (nach DIN EN 10216-1:2014-03)  
PN63

Druckstufe Zu- und Abblaseleitungen:

Sicherheitsventil:

Größe: DN25x50  
 Reduzierte Ausflussziffer Gas  $K_{dr,g}$ : 0,8  
 Reduzierte Ausflussziffer Flüssigkeit  $K_{dr,l}$ : 0,6  
 Sitzdurchmesser  $d_0$ : 20 mm  
 Ansprechüberdruck des Sicherheitsventils  $p_{set}$ : 45 bar g  
 Abstand des Sicherheitsventils zum Boden 7 m

Umgebungsbedingungen:

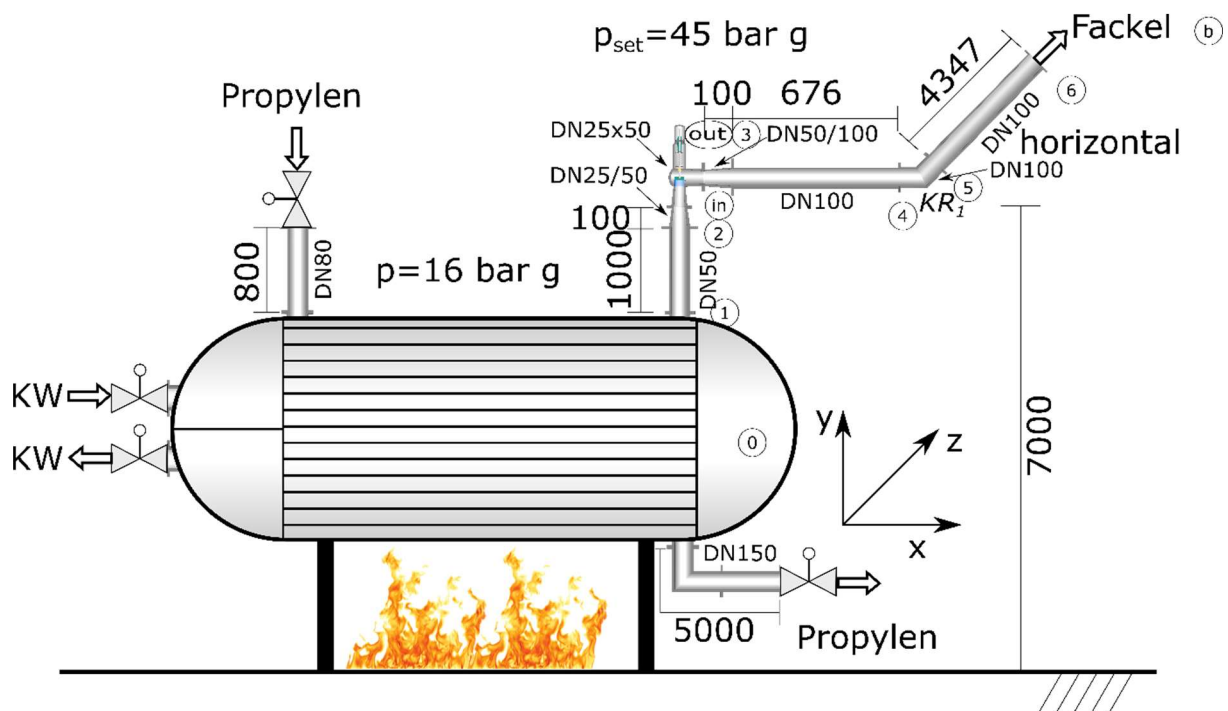
Umgebungstemperatur  $T_b$ : 293,15 K  
 Umgebungsdruck  $p_b$ : 1,013 bar abs

Brandschutzkonzept:

Dauer bis zum Greifen des Brandschutzkonzeptes: 35 min

Alle Stoffdaten sind selbst zu ermitteln.

Die Ergebnisse sind in **Tabelle 2** darzustellen.



**Abbildung 1:** Aufbau der Abblaseleitung und Daten für die Berechnung der Ergebnisse im EURSIG Sizing Case Report ESC\_108

**Tabelle 2:** Ergebnistabelle

<b>Punkt</b>	<b>Druck in bar abs</b>	<b>Temperatur in K</b>
<b>op</b>	17,013	314,55
<b>0</b>	50,513	
<b>1</b>		
<b>2</b>		
<b>in</b>		
<b>out</b>		
<b>3</b>		
<b>4</b>		
<b>5</b>		
<b>6</b>		
<b>b</b>	1,013	293,15