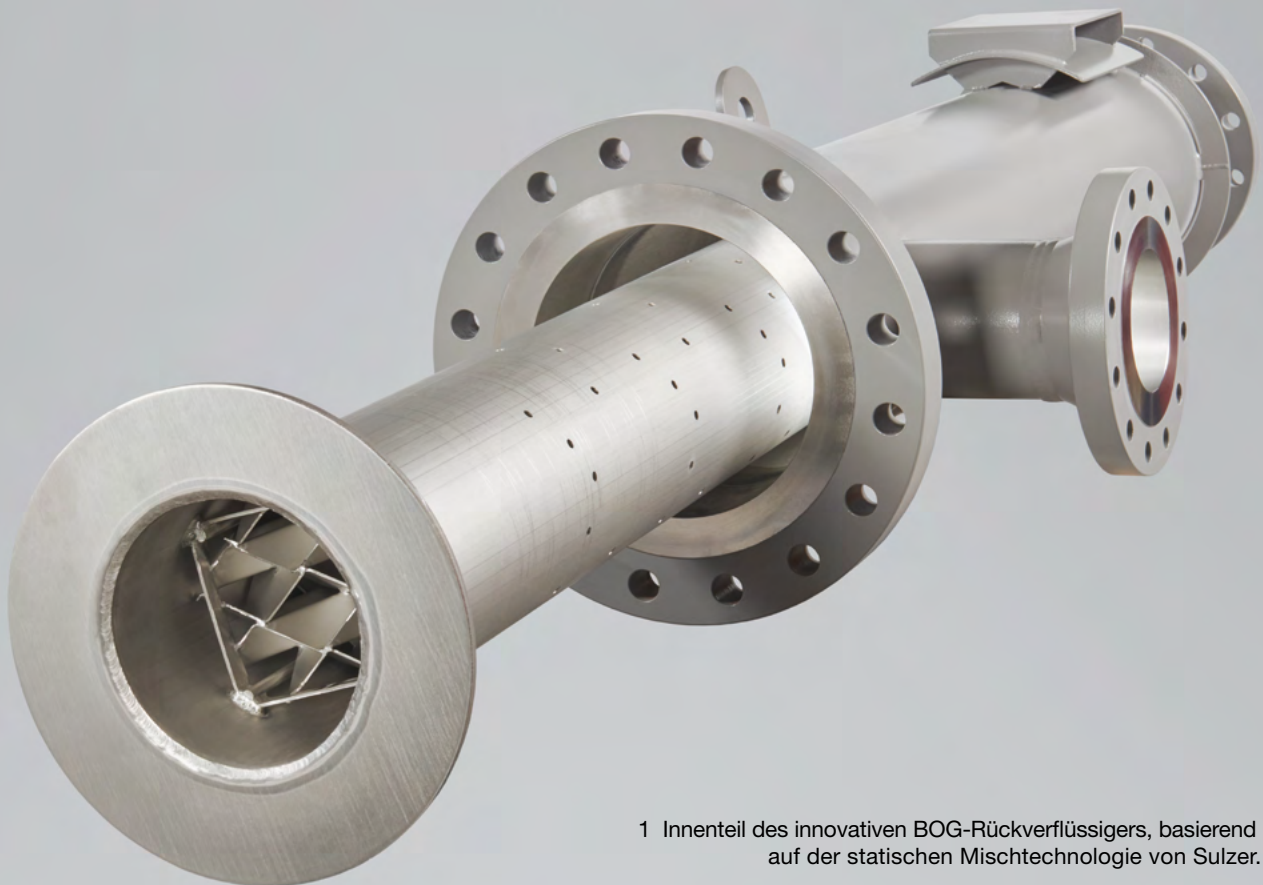


Innovative Rückverflüssigung von Boil-Off-Gas

Boil-Off-Gas (BOG) ist ein Nebenprodukt, das beim Transport von Flüssigerdgas (LNG) auf LNG-Tankern und bei der Entladung und Speicherung in Anlande- und Rückverdampfungsterminals entsteht. Normalerweise wird überschüssiges BOG rückverflüssigt und als LNG in den Kreislauf zurückgeführt. Üblicherweise geschieht dies in relativ grossen Kolonnen mit strukturierten Packungen. Sulzer hat ein innovatives Verfahren zur Rückverflüssigung von BOG mithilfe statischer Mischer entwickelt. Die Hauptvorteile dieser alternativen Technologie sind erhebliche Platz- und Gewichtseinsparungen, womit sich diese Lösung besonders für Offshore-Anwendungen eignet.



1 Innenteil des innovativen BOG-Rückverflüssigers, basierend auf der statischen Mischtechnologie von Sulzer.

Stoffe für den Transport einfach zu schrumpfen und anschliessend wieder zu vergrössern, ist der Traum vieler Branchen. Der Erdgasindustrie ist dies gelungen. Durch Abkühlen auf ca. -161°C kann Erdgas verflüssigt werden, wobei sich das Volumen um etwa das 600-fache reduziert. Das so verflüssigte Erdgas (Liquefied Natural Gas, LNG) wird mit speziellen Tankschiffen transportiert und am Zielort entladen und wieder verdampft. Ein modernes Tankschiff kann über 260 000 m^3 LNG aufnehmen. Diese Schiffe ermöglichen die Belieferung internationaler Märkte unabhängig von Pipelines.

Die LNG-Lieferkette

Die Produktion von LNG ist ein aufwendiger Prozess. Nach der Förderung des Erdgases sind spezielle Aufbereitungsschritte erforderlich, bevor es heruntergekühlt und verflüssigt wird (Abb. 2). Kohlenwasserstoffkondensat und wässrige Flüssigkeiten (die Monoethylenglykol oder Methanol enthalten) werden in Separatoren abgeschieden. Gelöstes Wasser, Quecksilber, Schwefelwasserstoff und Kohlendioxid werden nacheinander in speziellen Verfahrensschritten entfernt. Schliesslich wird das aufbereitete Erdgas in einem kryogenen Hauptwärmetauscher (MCHE) gekühlt und zu LNG verflüssigt. Das LNG wird in Tanks gespeichert und für den Export in andere Teile der Welt auf LNG-Tanker verladen. Während des Transports fällt BOG durch Verdampfung an. In modernen LNG-Tankern wird das BOG rückverflüssigt und dem LNG wieder zugeführt, um Kosten zu sparen und die Nachhaltigkeit zu verbessern.

Am Anlande- und Wiederverdampfungsterminal wird das LNG entladen, in Tanks gespeichert und anschliessend zu Hochdruck-Verkaufsgas verdampft. Dieses gelangt schliesslich über Tankstellen oder Gasnetze zum

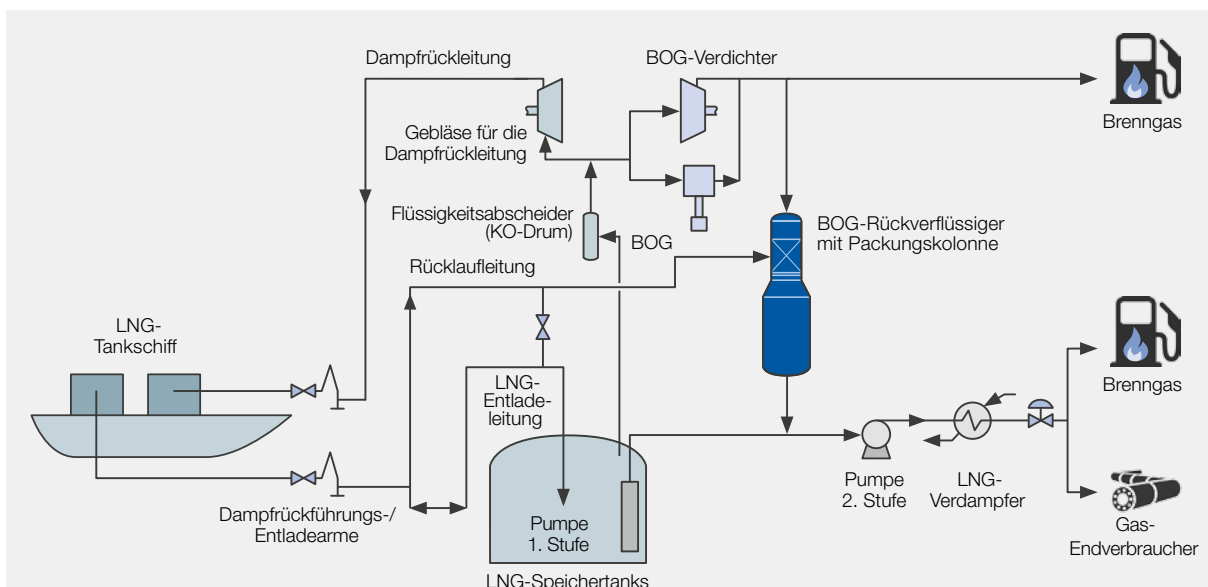
LNG – von der Förderung über den Transport zum Verbrauch

1	Erdgasförderung
2	Entfernen von Kohlenwasserstoffkondensat, wässrigen Flüssigkeiten, gelöstem Wasser, Quecksilber, CO_2 und H_2S
3	Kühlung und Verflüssigung des Gases bei ca. -161°C
4	LNG-Speicherung und Verladung auf LNG-Tanker
5	LNG-Transport (mit BOG-Rückverflüssigung auf modernen LNG-Tankern)
6	Anlandung und Wiederverdampfung im LNG-Terminal (mit BOG-Rückverflüssigung)
7	Verteilung von verdampftem Erdgas an Endverbraucher einschliesslich Kraftwerken und Privathaushalten

2 LNG – von der Förderung über den Transport zum Verbrauch.

Endverbraucher. Während des Prozesses wird ein Teil des LNG zu Niederdruck-BOG verdampft. Ein Teil des BOG wird über die Dampfrückleitung zum LNG-Tanker zurückgeführt, um den Druck für die Entladung aufrecht zu halten. Verfügt der Tanker über einen gasbetriebenen Motor, wird ein Teil des BOG als Brennstoff für das Schiff genutzt. Das übrige BOG wird über den BOG-Verdichter dem BOG-Rückverflüssiger zugeführt (Abb. 3).

Herkömmliche BOG-Rückverflüssiger sind relativ grosse Kolonnen, die Schüttfüllkörper oder strukturierte Packungen enthalten. An der Packungsoberfläche kommt das BOG mit unterkühltem LNG in Kontakt. Der anschliessende Wärme- und Stoffübergang führt zur Absorption und Kondensation des BOG. Die Kolonnen sind normalerweise für den Gleichstrombetrieb ausgelegt und werden mit 3 bis 10 bar und kryogenen Temperaturen (ca. -161°C) betrieben.



3 Schematische Darstellung eines typischen LNG-Anlande- und Wiederverdampfungs terminals.

Verkleinerung des BOG-Rückverflüssigers

Stets auf der Suche nach Möglichkeiten zur Optimierung vorhandener Prozesse, kamen die Ingenieure von Sulzer auf die Idee, statische Mischtechnologie für die BOG-Rückverflüssigung einzusetzen. Diese arbeitet mit einem völlig anderen Mechanismus. Während Packungskolonnen mit einer gasförmigen kontinuierlichen Phase arbeiten, ist diese beim statischen Mischer flüssig. So konnte Sulzer die Grösse und das Gewicht des BOG-Rückverflüssigers erheblich reduzieren, was dem Kunden wiederum Platz-, Gewicht- und Kosteneinsparungen ermöglicht.

Funktionsprinzip des BOG-Rückverflüssigers mit statischem Mischer

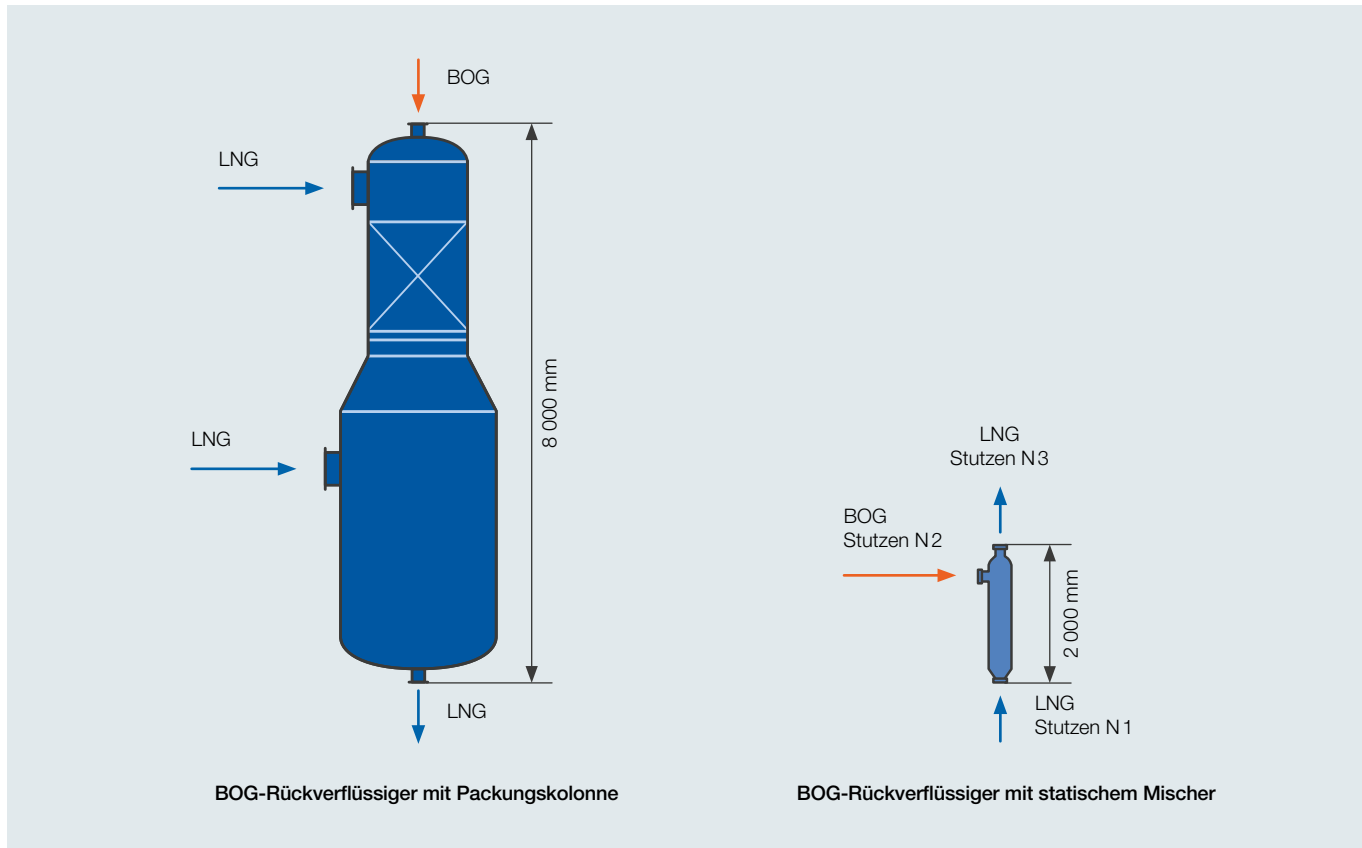
Der Rückverflüssiger besitzt ein doppelwandiges Gehäuse, wobei die statischen Mischerelemente im Innenrohr angeordnet sind. Das unterkühlte LNG gelangt durch den Stutzen N1 in das innere Rohr, während das BOG durch den Stutzen N2 in den ringförmigen Raum zwischen Innen- und Aussenwand geleitet wird. Das LNG verlässt den Rückverflüssiger durch den Stutzen N3.

Betriebsbedingungen und Zulaufdaten

Bedingungen	Einheit	Wert
Kolonnendruck (oben)	bar(a)	5.0
BOG-Zulaufrate	kg/h	10 000
BOG-Zulauftemperatur	°C	1.0
BOG-Zusammensetzung	mol%	2.0% Stickstoff 98.0% Methan
LNG-Zulaufrate	kg/h	95 000
LNG-Zulauftemperatur	°C	-161.5
LNG-Zusammensetzung	mol%	0.1% Stickstoff 0.4% i-Butan 0.5% n-Butan 3.1% Propan 8.0% Ethan 87.9% Methan

5 Betriebsbedingungen und Zulaufdaten für die Fallstudie zum BOG-Rückverflüssiger.

Vom Ringraum dringt das BOG durch speziell konstruierte Löcher in der Innenwand in das Innenrohr (Abb. 1, Seite 16). Die hohe Eintrittsgeschwindigkeit



4 Vergleich beider BOG-Rückverflüssigerkonzepte für die Fallstudie.

des BOG führt zu einer intensiven Vermischung mit dem unterkühlten LNG, das im Mischer nach oben strömt. Die Sulzer-eigenen statischen Mischerelemente bewirken eine radiale Vermischung und eine verstärkte Turbulenz des Fluids, was zu einem Wärmeübergang und Temperatenausgleich führt. Im Vergleich zu Packungskolonnen erreicht die statische Mischertechnologie eine effizientere Kondensation und Absorption des BOG.

Zusätzliche Vorteile des neuen Konzepts

Die statische Mischertechnologie zeichnet sich durch eine hohe betriebliche Stabilität und Flexibilität aus. Der BOG-Durchfluss ist normalerweise nicht stabil, und häufig werden komplexe Split-Range-Regler eingesetzt, um den Betriebsdruck in der Packungskolonne aufrecht zu halten. Bei dem statischen Mischer hingegen verändert sich der Flüssigkeitsstand im Ringraum entsprechend dem BOG-Durchfluss, sodass sich der BOG-Rückverflüssiger selbst reguliert. Damit ist weniger Instrumentierung für die Prozessregelung erforderlich, was die neue Technologie für den Kunden kostengünstiger macht. Der innovative BOG-Rückverflüssiger ist dank eines breiteren Betriebsbereichs einfacher zu bedienen als herkömmliche Anlagen. Spitzendeckungsanlagen mit stark schwankender LNG-Ausspeisung profitieren besonders vom breiten Betriebsbereich des innovativen Konzepts.

Druckabfall beeinflusst die Prozesssicherheit

Der BOG-Rückverflüssiger mit statischem Mischer benötigt für seinen Betrieb einen bestimmten Druckabfall. Während der Druckabfall bei BOG-Rückverflüssigerkolonnen etwa 10 mbar beträgt, liegt er mit dem statischen Mischer normalerweise im Bereich von 300 bis 500 mbar. Je höher der Druckabfall, desto weniger empfindlich ist die Technologie gegenüber Neigungs- und Bewegungszuständen. Damit eignet sich der BOG-Rückverflüssiger mit statischem Mischer ideal für Offshore-Anwendungen wie FSRUs (Floating Storage and Regasification Units).

Im Rahmen einer für einen europäischen Kunden durchgeführten Fallstudie wurden die beiden verschiedenen Konzepte für einen landseitigen BOG-Rückverflüssiger verglichen und evaluiert. Abb. 4 zeigt die bemerkenswerte Größenreduktion: Im Gegensatz zu einer 8 m hohen Rückverflüssigerkolonne ist der BOG-Rückverflüssiger mit statischem Mischer nur 2 m hoch. Abb. 5 fasst die wichtigsten Betriebsparameter und Zulaufdaten der Fallstudie zusammen.

Seit 2012 erfolgreich im Einsatz auf mobilem LNG-Empfangs- und Wiederverdampfungsterminal (FSRU)

Das in Indonesien im Einsatz befindliche FSRU Nusantara Regas Satu ist das erste seiner Art in Asien. Ursprünglich als LNG-Tanker Khannur gebaut, wurde das Schiff 2011 zum FSRU umgebaut (LNG World News, 2011) und ist seit 2012 mit einem BOG-Rückverflüssiger auf der Basis eines statischen Mischers von Sulzer erfolgreich in Betrieb (Golar LNG, 2016). Der Kunde lobt die betriebliche Stabilität des innovativen Rückverflüssigers. Trotz schwankender Prozessbedingungen (z. B. im Hinblick auf den BOG-Durchfluss) hält der Rückverflüssiger den gesamten BOG-Rückverflüssigungsprozess stabil.

Offshore-Anwendung auf FSRUs

Ein FSRU ist ein mobiler LNG-Empfangs- und Wiederverdampfungsterminal auf einem Offshore-Schiff. Besonders bei rauer See unterliegt die Ausrüstung auf einem FSRU bestimmten Neigungs- und Bewegungszuständen. Im Vergleich zu Onshore-Anlagen müssen die Prozesse an die schwankenden Bewegungen angepasst werden. Auch die Hydraulik und Mechanik müssen für den Offshore-Einsatz ausgelegt sein. Neigung und Bewegung können in herkömmlichen BOG-Rückverflüssigern zu einer schlechten Gas- und Flüssigkeitsverteilung und somit zur Beeinträchtigung der Kolonnenleistung führen. Um die Rückverflüssigungsfunktion in diesen Anlagen zu gewährleisten, werden die konstruktiven Reserven für Offshore-Anwendungen vergrößert, wodurch sich auch die Kolonnenabmessungen vergrößern. Beim statischen Mischer hingegen spielt eine ungleichmässige Verteilung keine Rolle, sodass für Offshore-Anwendungen nur minimale konstruktive Reserven erforderlich sind.

Alles in allem bietet der neue BOG-Rückverflüssiger mit statischem Mischer mehrere Vorteile. Durch die geringere Grösse kann das Fundament leichter ausfallen, und die Investitionskosten für die gesamte Anlage sind niedriger. Die hohe Prozessstabilität und Flexibilität in Verbindung mit einer einfachen Bedienung reduziert Fehler und Ausfallzeiten. Ein weiterer Vorteil der geringeren Grösse: Der begrenzte Platz auf FSRUs macht den kleineren BOG-Rückverflüssiger zur bevorzugten Lösung für Offshore-Anwendungen.

Autor: Ming Yang Lee

sulzertechnicalreview@sulzer.com