

# DIPLOMARBEIT

## Sicherheitstechnische Bewertung von Thermoölkreisläufen bei Biomasseheizkraftwerken

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs  
unter der Leitung von

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Tobias Pröll

am Institut für  
Verfahrens- und Energietechnik

eingereicht an der Universität für Bodenkultur Wien  
Department für Materialwissenschaften und Prozesstechnik

von

Stefan Huber  
Zentagasse 18/35-36 A-1050 Wien

Wien, 17. März 2014





# Vorwort und Danksagung

Im Rahmen meines Masterstudiums „Umwelt- und Bioressourcenmanagement“ mit dem Fachbereich Energie wollte ich meine Diplomarbeit in Zusammenarbeit mit einem Unternehmen schreiben. Die Beweggründe dafür waren die Nähe zur beruflichen Praxis, die Sammlung von Arbeits Erfahrung und schließlich die Entlohnung. Das Ingenieurbüro VOIGT+WIPP Engineers GmbH gab mir die Möglichkeit dazu und stellte mich auf Teilzeitbasis an. In Zusammenarbeit mit Prof. Tobias Pröll vom Institut für Verfahrens- und Energietechnik an der Universität für Bodenkultur Wien und Dipl. Ing. Richard Wipp wurde das Thema der Diplomarbeit „sicherheitstechnische Bewertung von Thermoölkreisläufen bei Biomasseheizkraftwerken“ festgelegt.

Ein besonderer Dank gilt dem Betreuer meiner Arbeit, **Prof. Tobias Pröll**. Vielen Dank für die Betreuung und die Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit. Meine Fragen fanden stets Gehör und wurden umgehend beantwortet. Deine klaren Ansagen und deine offene Art sind mir sehr entgegen gekommen.

Ich möchte mich auch bei **Prof. Wolfgang Liebert** für sein Interesse an meiner Arbeit bedanken und dass er sich sofort bereit erklärt hat, mich bei dieser Diplomarbeit mitzubetreuen.

Ein weiteres Dankeschön gilt dem Unternehmen VOIGT+WIPP Engineers GmbH. Dabei möchte ich mich speziell bei **Dipl.-Ing. Richard Wipp** bedanken, der die Rahmenbedingungen geschaffen hat und mir die Möglichkeit gegeben hat, meine Diplomarbeit in Zusammenarbeit mit seinem Unternehmen zu erstellen. Ich weiß das Vertrauen, welches du in mich gesetzt hast, zu schätzen. Des Weiteren möchte ich mich bei **Dr. Bernhard Kronberger** bedanken, der mir inhaltlich immer zur Seite gestanden hat und mich stets unterstützt hat. Auch bei **David Hechinger** möchte ich mich für seine zahlreichen Erklärungen und Geduld, die vor allem in der Anfangsphase nötig waren, bedanken.

Der größte Dank gilt meinen Eltern, **Ludwig** und **Claudia**, ohne deren finanzielle Unterstützung sie diese Zeilen nie lesen könnten. Vielen Dank fürs da sein und die großartige Unterstützung in jeglicher Hinsicht! Ein weiteres Dankeschön geht an meine Schwester **Katharina**, die, ohne Zweifel, immer an mich geglaubt hat. Ein großer Dank geht auch an meine süße Maus, **Daniela**, für das Korrekturlesen dieser Arbeit und die angenehme Ablenkung von der Diplomarbeit. Nicht zuletzt danke ich meinen **Freunden** für die großartige Unterstützung und lustige Freizeitgestaltung.



# Kurzfassung

In den vergangenen Jahren ereigneten sich einige Zwischenfälle in Biomasseheizkraftwerken mit Thermoölkreisläufen, die in einem Brand endeten. Im Zuge dieser Arbeit wurde versucht die gefährlichen Anlagenkomponenten und Szenarien ausfindig zu machen und darauf aufbauend, Empfehlungen zur Verbesserung der Sicherheit zu geben.

Um die gefährlichen Komponenten und Szenarien eines Thermoölkreislaufs aufzudecken, wurden zwei Methoden eingesetzt. Zum einen wurde eine HAZOP-Studie durchgeführt, in der systematisch sämtliche Abweichungen vom Sollzustand untersucht wurden. Die Ursachen und Konsequenzen einer Abweichung und die Schutzeinrichtungen gegen eine solche Abweichung wurden untersucht. Es folgte die Einteilung der Abweichungen auf Grundlage ihrer Gefährlichkeit in Sicherheits-Integritätslevel (SIL). Dies erfolgte mit Hilfe des qualitativen Risikographen. Ergänzend dazu wurden drei Experteninterviews mit Personen durchgeführt, die bei einem Brand in einem Biomasseheizkraftwerk mit Thermoölkreislauf entweder direkt vor Ort waren, bzw. über sämtliche Informationen zum Brandereignis verfügen.

Die Ergebnisse der HAZOP-Studie und der Experteninterviews haben gezeigt, dass es insbesondere durch Überhitzungen des Thermoöls im Kesselbereich zu gefährlichen Situationen kommen kann. In weiterer Folge kann es dabei zum Austritt von Thermoöl im Kessel kommen. Des Weiteren sind Leckagen im Thermoölkreislauf eine große Gefahr. Bei allen drei Experteninterviews, die im Zuge der Arbeit durchgeführt wurden, basierte der Brand auf einer Leckage (Thermoölverlust).

Die gesetzlichen Anforderungen an Thermoölkreise sind nicht ausreichend für einen sicheren Betrieb. Sie sollten als Basis aufgefasst werden, auf der sicherheitstechnisch aufgebaut werden kann. Die Gefahren, die ein Thermoölkreislauf beherbergt, können teilweise eliminiert bzw. minimiert werden, jedoch lassen sich in der Praxis die Gefahren nicht vollständig beseitigen. Dies liegt zum einen an den hohen Prozesstemperaturen, dem damit verbundenen Materialverschleiß und zum anderen an betriebswirtschaftlichen Aspekten von Investitionen zur Steigerung der Sicherheit.



# Abstract

This work examines the safety of thermal oil cycles in biomass CHP plants. In recent years there have been a number of incidents in biomass CHP plants with thermal oil cycles, which ended in a fire. In the course of this study dangerous elements and scenarios of the thermal oil cycle were attempted to be located and building on that recommendations for safety improvements have been made.

In order to uncover the dangerous elements and scenarios of a thermal oil cycle, two methods were used. On the one hand, a HAZOP study was conducted in which all deviations from the system design intent were examined systematically. The possible causes and consequences of a deviation and the safeguards against such a deviation were examined. This was followed by the classification of the deviations, on the basis of their hazard, into safety integrity levels (SIL). This was done using the qualitative risk graph. In addition to this, three expert interviews were conducted. The people interviewed have either been on site in the biomass CHP plant when the fire started, or they have all the information about the fire incident.

The results of the HAZOP study and expert interviews have shown that especially overheating of thermal oil in the thermal oil boiler can lead to hazardous situations. Subsequently, this may lead to a leakage of thermal oil. Obviously, leaks in the hot thermal oil cycle present a great danger. In all three expert interviews that were conducted in the course of this work, the fire was based on a leakage (thermal oil loss).

The legal requirements for thermal oil cycles are not sufficient for safe operation. They should be regarded as a basis on which further safety actions can be built on. The hazards of a thermal oil cycle can be partially eliminated respectively minimized. However all hazards cannot be eliminated completely. On the one hand, this is due to the fact that the process temperatures are rather high which leads to material wear and on the other hand safety measures are not implemented if high investment costs would significantly decrease the economic plant performance.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort und Danksagung</b>	<b>i</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract</b>	<b>v</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Diskussion</b>	<b>3</b>
2.1 Funktionsweise eines Thermoölkreislaufs mit ORC-Modul zur Energieproduktion	3
2.2 Normen und Regelwerke für einen Thermoölkreislauf . . . . .	10
2.2.1 Normen und Regelwerke zur Konstruktion eines Thermoölkreislaufs . . . . .	10
2.2.2 Normen und Regelwerke zur Inbetriebnahme und zum Betrieb von Thermoölkreisläufen . . . . .	14
2.3 Sicherheitstechnische Systeme und Sicherheits-Integritätslevel . . . . .	16
<b>3 Fragestellung</b>	<b>21</b>
<b>4 Material und Methoden</b>	<b>23</b>
4.1 Allgemeine Informationen zur HAZOP-Studie und den Experteninterviews . . . . .	23
4.1.1 Die Theorie zur HAZOP-Studie . . . . .	23
4.1.2 Die Theorie zu den Experteninterviews . . . . .	31
4.2 Praktische Umsetzung der HAZOP-Studie und der Experteninterviews . . . . .	32
4.2.1 Umsetzung der HAZOP-Studie . . . . .	32
4.2.2 Umsetzung der Experteninterviews . . . . .	36
<b>5 Ergebnisse</b>	<b>39</b>
5.1 Ergebnisse der HAZOP-Studie . . . . .	39
5.1.1 Abweichung des Durchflusses . . . . .	40
5.1.2 Abweichung der Temperatur . . . . .	49
5.1.3 Abweichung des Drucks . . . . .	57
5.1.4 Abweichung durch Vermischung . . . . .	64
5.1.5 Sonstige Abweichungen . . . . .	71
5.1.6 Zu prüfende Punkte und Empfehlungen . . . . .	75
5.2 Ergebnisse der Experteninterviews . . . . .	89
5.2.1 Experteninterview mit Herrn Manfred Mäser zum Brandereignis in Hard . . . . .	90

5.2.2	Experteninterview mit Herrn Ing Enes Hamidovic zum Brandereignis in Toblach-Innichen . . . . .	92
5.2.3	Experteninterview mit Herrn Ing. Günther Seiffter zum Brandereignis in Altenmarkt . . . . .	94
<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>97</b>
<b>7</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick</b>	<b>101</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>103</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>105</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>107</b>
	<b>Anhang</b>	<b>111</b>
	Die HAZOP-Studientabelle . . . . .	112
	Schema Thermoölkreislauf . . . . .	121

# 1 Einleitung

Derzeit wird der Großteil unseres Endenergieverbrauchs noch von fossilen Energieträgern dominiert. Da die fossilen Energieträger jedoch nur in begrenztem Ausmaß verfügbar sind und sich bei weitem nicht so schnell regenerieren wie sie genutzt werden, muss die Gesellschaft früh genug alternative Energien in den Energiemix integrieren. Damit der Umstieg von endlichen auf erneuerbare Energiequellen möglichst sanft verläuft hat das europäische Parlament und der europäische Rat bereits vor Jahren Gesetze zur Förderung von erneuerbaren Energien verabschiedet, um den Ausbau dieser regenerativen Energien zu fördern. Diese Richtlinien wurden in Österreich in nationales Recht umgesetzt.

Aufgrund der klimatischen und geografischen Bedingungen gehört in Europa und somit in Österreich die solare Strahlung, die Windenergie, die Wasserkraft, die Erdwärme und die Biomasse zu den förderungswürdigen erneuerbaren Energieträgern (Kaltschmitt et al., 2009). Die wichtigsten erneuerbaren Energiequellen mit dem größten Potential in Österreich sind die Wasserkraft und die Biomasse. In einem Bericht des Lebensministeriums geht hervor, dass im Jahr 2011 eine Leistung von 123 PJ aus Wasserkraft und 96 PJ aus Biomasse erzeugt wurde (Lebensministerium, 2013). Während die Waldfläche weltweit immer mehr abnimmt, vor allem durch großflächige Rodungen von tropischen Regenwäldern, nimmt die Waldfläche in Mitteleuropa und Österreich seit Jahren stetig zu (Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, 2011).

Zur Energiegewinnung aus Biomasse werden heutzutage nur noch geschlossene thermische Systeme verwendet, die mit einem sauberen Prozessmedium arbeiten. So kann vermieden werden, dass Flugaschepartikel, Metalle oder andere Substanzen die Turbine beschädigen (van Loo, S. und Koppejan J., 2008). In der Praxis hat sich bis heute vor allem die Dampfturbine, welche mit Wasser als Arbeitsmedium arbeitet, bewährt. Eine weitere Technologie, die sich mittlerweile auch schon behauptet hat ist eine Turbine, die mit einem organischen Medium (ORC - Organic Rankine Cycle) angetrieben wird. Wenn die Stromproduktion aus Biomasse mit einem ORC-Kreislauf erfolgt, braucht es zur konstanten und gleichmäßigen Wärmeabgabe auf das ORC-Medium im ORC eine Wärmeträgerflüssigkeit (englisch: heat transfer fluid), in dieser Arbeit als Thermoöl bezeichnet.

In den Jahren 1998 und 1999 wurde im Rahmen eines europäischen Demonstrationsprojektes erstmals innerhalb der EU die ORC-Technologie in einer Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungsanlage eingesetzt. Dieses Vorreiterprojekt wurde in der „Holzindustrie STIA“ in Admont in der Steier-

mark gebaut (Oberberger et al., 2001). Nach Admont folgte in Österreich der Bau der Biomasseheizkraftwerke Lienz und Hard, die ebenfalls mit einem ORC-Modul ausgestattet wurden. In den folgenden Jahren wurden dann vermehrt Biomasseheizkraftwerke mit Thermoöl- und ORC-Kreislauf in Betrieb genommen. Das erhöhte Bauvorkommen zur Zeit der Jahrtausendwende und in den Jahren danach, ist auf die, zu dieser Zeit, hohen Ökostromförderungen zurückzuführen.

Einem Bericht des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT) aus dem Jahre 2008 geht hervor, dass es zu diesem Zeitpunkt 27 Biomasseheizkraftwerke mit einem ORC-Modul in Österreich gab. Das BMVIT erhebt in diesem Bericht jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Nach dem Erscheinen dieses Endberichtes dürften kaum mehr Anlagen dazugekommen sein (Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2008). Diese Biomasseheizkraftwerke mit ORC-Modulen arbeiten alle in einem Leistungsbereich  $P_{el}$  zwischen 400 kW und 1,5 MW (van Loo, S. und Koppejan J., 2008). Die Leistungen der Biomasseheizkraftwerke, die mit der ORC-Technologie arbeiten, sind nach oben hin begrenzt. Dies liegt zum Einen an der Staffelung der Einspeisetarife, da ab einer Leistung von  $2\text{ MW}_{el}$  eine geringe Förderhöhe vorliegt. Zum Anderen liegt es an technischen Faktoren, wie der Größe des Fernwärmenetzes von ländlichen Gemeinden und der Verfügbarkeit von Komponenten am Markt (Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2008).

Alle Biomasseheizkraftwerke, die mit einem ORC-Modul arbeiten, brauchen zur gleichmäßigen, konstanten Energieabgabe an das ORC-Arbeitsmedium einen Thermoölkreislauf. Um einen möglichst hohen Wirkungsgrad zu erzielen wird eine sehr hohe Vorlauftemperatur für das Thermoöl gewählt. Des Weiteren lässt sich das Thermoöl mit steigenden Temperaturen besser verwenden (die Viskosität sinkt, die spezifische Wärmekapazität steigt). In der Praxis beträgt die Vorlauf-temperatur (nach dem Thermoölkesselaustritt) ca.  $300\text{ °C}$  und die Rücklauf-temperatur liegt bei ca.  $250\text{ °C}$ . Dieser Temperaturbereich liegt nur wenige Grad Celsius unter der maximal zulässigen Verwendungstemperatur und dem Siedepunkt des Thermoöls.

Die Vergangenheit hat gezeigt, dass es immer wieder zu größeren und kleineren Unfällen in Zusammenhang mit Thermoölkreisläufen kommen kann. Drei größere Unfälle, die von schadhaf-ten Thermoölkreisläufen ausgingen, werden in dieser Arbeit noch genauer untersucht. Wenn es zu einem Schaden im Bereich des Thermoölkreislaufes kommt, können Personen direkt, durch austretendes Thermoöl, verletzt werden bzw. kann ein Brand entstehen, der schnell um sich greift und nur sehr schwer wieder unter Kontrolle zu bringen ist. Des Weiteren geht es in dieser Arbeit darum, die sicherheitstechnisch gefährlichen Bereiche des Thermoölkreislaufs zu indentifizieren und eventuell Vorschläge zur Verbesserung der Situation zu generieren.

Die Bauweisen von Biomasseheizkraftwerken mit Thermoölkreislauf und ORC-Modul weichen nur gering von einander ab. Als Beispielanlage wurde in dieser Arbeit das Biomasseheizkraftwerk Großarl der Hackschnitzel-Heizgenossenschaft Großarl verwendet.

## 2 Stand der Diskussion

Zu Beginn dieses Kapitels wird die Energieproduktion mit einem ORC-Modul, welches einen Thermoölkreislauf benötigt, detailliert besprochen. Danach werden die wichtigsten Normen, Gesetze und Regelwerke zu den Thermoölkreisläufen analysiert und mit der Umsetzung in der Beispielanlage im Biomasseheizkraftwerk Großarl verglichen. Am Ende dieses Kapitels werden die sicherheitstechnischen Systeme und die Einstufung in Sicherheits-Integritätslevels beschrieben.

### 2.1 Funktionsweise eines Thermoölkreislaufs mit ORC-Modul zur Energieproduktion

Um die Energieproduktion mit einem ORC-Modul besser verstehen zu können, wird eine beispielhafte und vereinfachte Abbildung eines ORC-Prozesses angeführt.

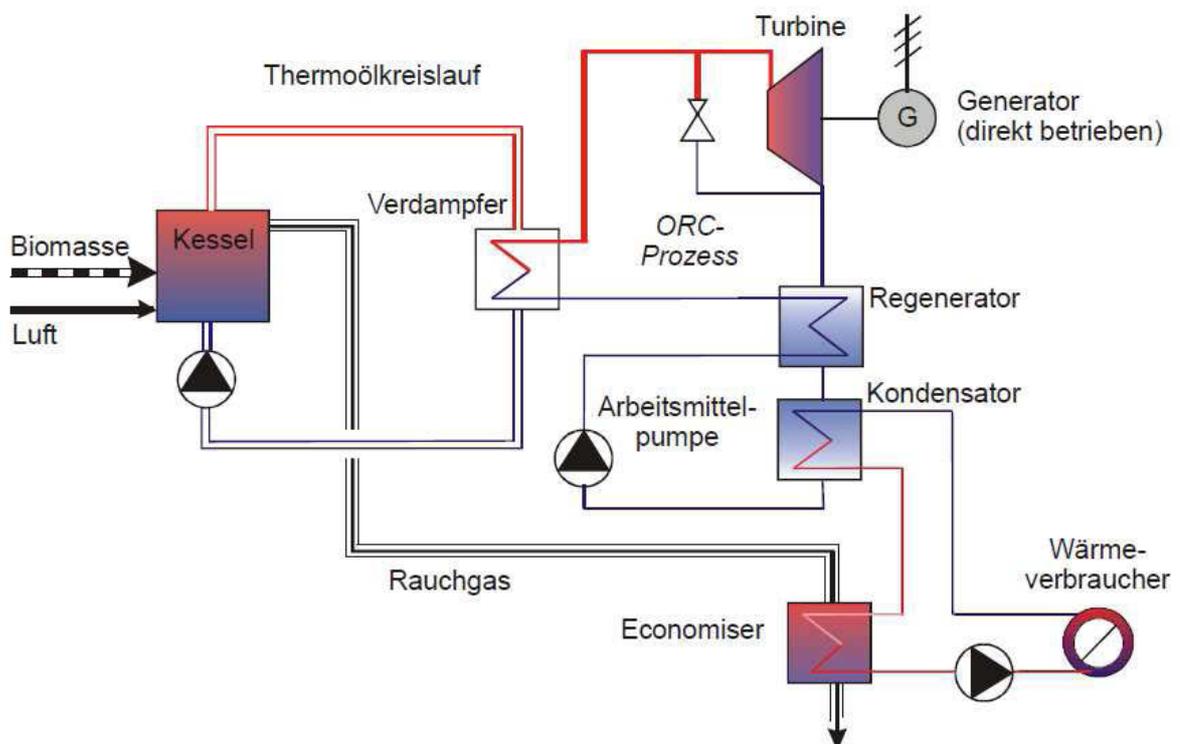


Abbildung 2.1: Flusschema eines ORC-Prozesses  
(Oberberger et al., 2001)

Der Prozess der Energieproduktion mit Hilfe eines ORC-Moduls beginnt mit dem Einschub der Biomasse in die Feuerkammer. In der Feuerkammer wird kontrolliert Luft über die Primär- und Sekundärluftventilatoren hinzugefügt, um für einen möglichst optimalen Ausbrand zu sorgen und somit die Emissionen möglichst gering zu halten. Die Verbrennung der Biomasse in der Feuerkammer läuft in drei Phasen ab. In der ersten Phase, der Trocknungsphase, wird der Brennstoff vorgewärmt und getrocknet. In der zweiten Phase, der Pyrolyse bzw. Vergasung, werden die flüchtigen Holzbestandteile in die gasförmige Phase überführt. Die dritte Phase, Oxidation, kann in die Brennphase und in die Ausbrandphase unterteilt werden. In dieser Phase reagieren die brennbaren Gase des Holzes mit dem zugeführten Sauerstoff (Obernberger, 1997). Die Temperaturen in der Feuerkammer sollten, um die Leistung des Thermoölkessels realisieren zu können, rund  $950^{\circ}\text{C}$  erreichen.



**Abbildung 2.2:** zur Entaschung gerade geöffnete Feuerkammer

Die heißen Rauchgase aus der Feuerkammer werden anschließend mit Hilfe des Rauchgasventilators aus der Feuerkammer und durch den Thermoölkessel gezogen. Der Thermoölkessel ist ein Wärmeübertrager in dem die Energie des heißen Rauchgases auf das Thermoöl übergeht. Um möglichst viel Energie aus dem Rauchgas zu entnehmen, wird der Rauchgasstrom aufgeteilt und durch lange Wege wird die Aufenthaltszeit des Rauchgases im Thermoölkessel verlängert. Nachdem die Rauchgase den Thermoölkessel verlassen haben, beträgt die Temperatur noch rund  $300^{\circ}\text{C}$ . Diese Restenergie kann mit weiteren Wärmeübertragern zur Effizienzsteigerung genutzt werden. Nachdem die Rauchgase sämtliche Abgasreinigungsschritte (Multizyklon, Elektronenfilter,...) passiert haben, werden sie über einen Kamin an die Atmosphäre abgegeben.

Der Thermoölkreislauf, bei dem es sich in der Regel um einen geschlossenen Kreislauf



**Abbildung 2.3:** Thermoölkessel in Grossarl

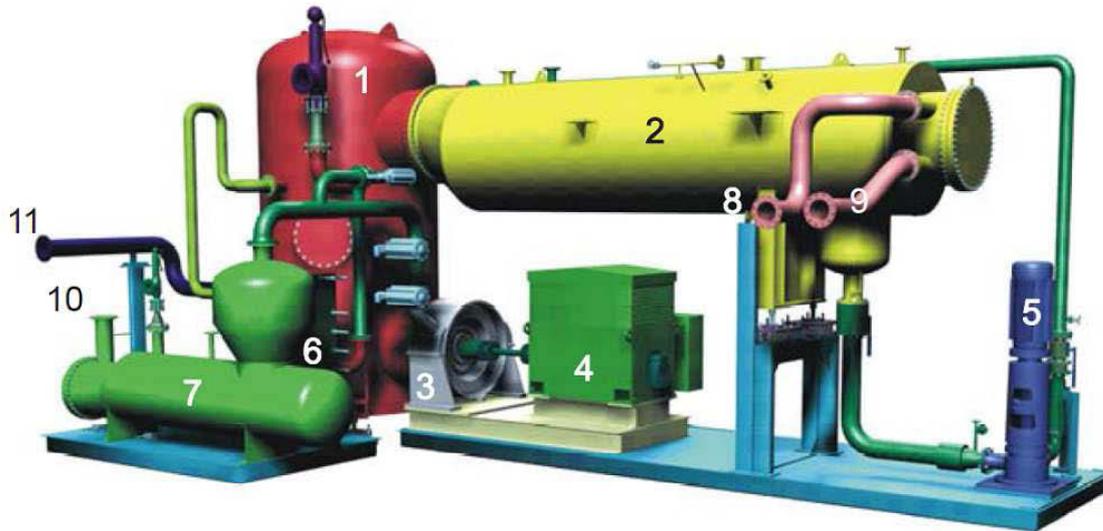
handelt, wird im Kessel auf durchschnittlich 300 °C Vorlauftemperatur (direkt nach dem Kessel) aufgeheizt. Das Thermoöl wird auf die maximale Temperatur gebracht, bei der es noch thermisch stabil ist und dauerhaft eingesetzt werden kann. Mit steigender Einsatztemperatur verbessert sich der Wirkungsgrad und zusätzlich die Eigenschaften des Thermoöls. Die Viskosität verringert sich und die spezifische Wärmekapazität steigt. (Wagner, 2005). Um Überhitzungen im Bereich des Thermoölkessels zu vermeiden, muss das Thermoöl konstant zirkulieren. Dafür sind zwei, redundant ausgeführte, Umwälzpumpen verantwortlich.

Die englische Bezeichnung des Thermoöls lautet „heat transfer fluid“. Aus diesem Begriff lässt sich auch die Aufgabe des Thermoöls ableiten. Das Thermoöl ist eine Wärmeübertragungsflüssigkeit, welche dazu verwendet wird konstant und gleichmäßig Energie an den ORC-Prozess abzugeben. Die Wärmeabgabe erfolgt beim Wärmeübertrager ORC, der gleichzeitig der Verdampfer im ORC-Kreislauf ist. Anschließend strömt das Thermoöl mit einer durchschnittlichen Temperatur von etwa 250 °C zurück in den Kessel, in dem wieder Energie zugeführt wird. Ein R&I-Schema des Thermoölkreislaufs des Biomasseheizkraftwerks in Großarl befindet sich im zweiten Teil des Anhangs.

Der ORC ist ein weiterer geschlossener Kreislauf, in dem ein organisches Arbeitsmedium, typischerweise ein Silikonöl zirkuliert. Die niedrige Siedetemperatur des ORC-Mediums (zwischen 70 und 300 °C - je nach Einsatzgebiet) ermöglicht einen Einsatz in einem relativ niedrigen Temperaturbereich. (van Loo, S. und Koppejan J., 2008). Während bei der Nutzung von Geothermie ORC-Medien mit einem sehr niedrigen Siedepunkt verwendet werden, werden bei der Verbrennung von Biomasse wesentlich höhere Temperaturen erreicht, was wiederum zur Folge hat, dass auch ORC-Medien mit einem höheren Siedepunkt verwendet werden können. In einem Bericht des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie über die „Energetisch und wirtschaftlich optimierte Biomasse-Kraft-Wärmekopplungssysteme auf Basis der derzeit verfügbaren Technologien“ wurden zwei Beispielanlagen untersucht, die mit einem ORC-Prozess auf Biomassebasis betrieben werden. Die erste Anlage erreichte ORC-Medientemperaturen von 266 °C vor der Turbine bzw. 226 °C nach der Turbine, die zweite Beispielanlage erreichte ORC-Medientemperaturen von 250 °C vor der Turbine bzw. 210 °C nach der Turbine (Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2008). Die gängigsten ORC-Arbeitsmedien die im Sektor der Biomasseverbrennung eingesetzt werden, sind Butylbenzene, Propylbenzene, Ethylbenzene, Toluene und OMTS (Octamethyltrisiloxane) (Drescher and Brüggemann, 2006).

Der ORC besteht im Wesentlichen aus fünf Komponenten, der Pumpe, dem Verdampfer, der Turbine, dem Regenerator und dem Kondensator. Die Pumpe sorgt für eine konstante Zirkulation des ORC-Mediums. Im Bereich des Verdampfers wird die Energie des Thermoöls an das ORC-Medium abgegeben. Durch die hohen Temperaturen verdampft das ORC-Medium. Das ORC-Medium, welches sich jetzt im gasförmigen Zustand befindet, strömt durch die Turbine, in der es sich entspannt. Die mechanische Arbeit der Turbine (Rotation) wird in einem Generator direkt in elektrische Energie umgewandelt und in das Stromnetz eingespeist. Nachdem der ORC-Mediumdampf die Turbine passiert hat gelangt dieser in den Regenerator. In diesem Wärmeübertrager gibt der ORC-Mediumdampf die restliche Energie an das ORC-Medium, welches

in flüssiger Form Richtung Verdampfer strömt, ab und wärmt somit das ORC-Medium vor. Auf den Regenerator folgt der Kondensator. Das Temperaturniveau im Kondensator ist wesentlich geringer, dadurch kondensiert das ORC-Medium und nimmt wiederum den flüssigen Aggregatzustand ein. Nach der Verflüssigung wird das ORC-Medium, durch den Regenerator, wieder zum Verdampfer geleitet und der Vorgang wiederholt sich. Die folgende Abbildung (Abbildung 2.4) zeigt ein ORC-Modul. In der Regel wird der ORC in einem einzigen kompakten Bauteil geliefert und installiert.

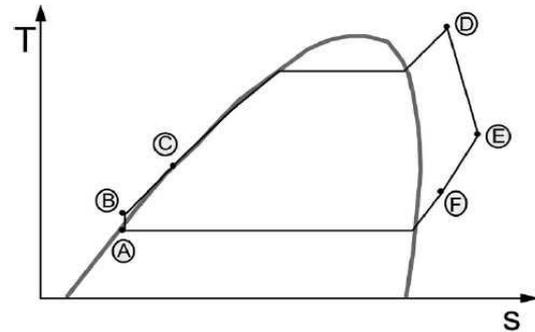


**Abbildung 2.4:** Bestandteile eines ORC-Moduls

1 Regenerator: dient der Vorwärmung des ORC-Mediums vor dem Eintritt in den Verdampfer (Effizienzsteigerung); 2 Kondensator; 3 Turbine; 4 elektrischer Generator; 5 Umwälzpumpe; 6 Vorwärmer: bei einem Split-System mit einem zweiten Thermoölkreis (Effizienzsteigerung; höhere Stromausbeute); 7 Verdampfer; 8 Fernwärme-Vorlauf; 9 Fernwärme-Rücklauf; 10 Thermoöl-Vorlauf; 11 Thermoöl-Rücklauf; (Oberberger et al., 2002)

Neben der Erzeugung von elektrischer Energie generiert der ORC auch thermische Energie, die in Form von Heißwasser in das Fernwärmenetz geschickt wird. Der „kühle“ Rücklauf des Wassers aus dem Fernwärmenetz strömt durch den Wärmeübertrager „Kondensator“. Dort sorgt das Wasser für Kühlung und somit für die Kondensation des ORC-Mediums. Dabei wird das Wasser erwärmt und dann wieder in das Fernwärmenetz geschickt. Zusätzlich kann zur Leistungssteigerung ein weiterer Wärmeübertrager eingesetzt werden, der die restliche Energie des Rauchgases auf das Wasser des Fernwärmenetzes abgibt. Die unterschiedlichen Flussschemata der ORC-Prozesse in der Literatur sind vom Prinzip her alle gleich. Der ORC-Prozess dient zur Gewinnung von elektrischer Energie und thermischer Energie. Die Abbildungen der Thermoölkreise können jedoch durch den Einsatz von weiteren Wärmeübertragern oder eines zweiten Thermoölkreises voneinander abweichen. (Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2008), (Drescher, 2008), (Oberberger et al., 2002), (Oberberger et al., 2001).

Die physikalischen Eigenschaften der ORC-Medien sind dafür verantwortlich, dass sich bei der Entspannung des gesättigten Dampfes in der Turbine, ein trockener Dampf bildet, statt eines nassen Dampfes wie bei einer Dampfturbine die mit Wasser angetrieben wird. Abbildung 2.5 zeigt das T-s Diagramm eines leicht überhitzten ORC-Prozesses. Im Unterschied zum Dampfturbinenprozess ist die Kondensationslinie beim ORC nach innen gekrümmt. Die X-Achse zeigt die spezifische Entropie ( $s$ ) des Prozesses (in  $J/kgK$ ) und die Y-Achse die Temperatur ( $T$ ). Die Verbindung von A nach B zeigt die Druckerhöhung des ORC-Mediums durch die Umwälzpumpe. Die Phase des Vorwärmens zeigt die Verbindung von Punkt B zu Punkt C. Die Verbindung von C nach D zeigt eine weitere Vorwärmphase, das Verdampfen des ORC-Mediums und das Überhitzen im Verdampfer. Die Strecke zwischen D und E zeigt die Expansion des ORC-Mediumdampfes in der Turbine. Die Verbindung von E nach F zeigt das Herunterkühlen des ORC-Mediums im Regenerator. Die letzte Verbindung des Kreislaufs (von Punkt F zu Punkt A) zeigt die Kondensation des ORC-Mediums im Kondensator (van Loo, S. und Koppejan J., 2008). Das ORC-Medium im ORC Prozess muss nicht zwangsläufig, wie von van Loo und Koppejan beschrieben, überhitzt werden. Ulli Drescher zeigt in seinem Buch „Optimierungspotential des Organic Rankine Cycle für biomassebefeuerte und geothermische Wärmequellen“ sowohl ein T-s Diagramm eines nicht-überhitzten ORC-Prozesses, als auch eines überhitzten ORC-Prozesses (Drescher, 2008).



**Abbildung 2.5:** T-s Diagramm eines leicht überhitzten ORC-Prozesses (van Loo, S. und Koppejan J., 2008)

### Die Anwendungsgebiete von biomassebefeuerten ORC-Prozessen, deren Effizienz und deren Vor- und Nachteile

Der Einsatzbereich von ORC-Prozessen liegt derzeit in einem Leistungsbereich von  $300\text{ kW}_{el}$  bis  $1,5\text{ MW}_{el}$  (van Loo, S. und Koppejan J., 2008). Dies deckt sich mit dem Bericht des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie, das eine Liste von Biomasseheizkraftwerken mit ORC-Prozess in Österreich veröffentlichte. Alle dabei betrachteten Biomasseheizkraftwerke, die einen ORC-Prozess zur Energiegewinnung verwenden, liegen leistungsmäßig in einem Bereich zwischen  $200\text{ kW}_{el}$  und  $1,5\text{ MW}_{el}$  (Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2008). In größeren thermischen Kraftwerken wird auf Dampfturbinen gesetzt, die einige  $100\text{ MW}_{el}$  erzeugen können. Dabei werden Dampfdrücke von bis zu 250 bar erreicht und der elektrische Wirkungsgrad kann auf bis zu 40% ansteigen. Im oben erwähnten Leistungsbereich ( $300\text{ kW}_{el}$  bis  $1,5\text{ MW}_{el}$ ) kann sich der ORC-Prozess mit dem Dampfturbinenprozess sowohl kostenmäßig, als auch effizienzmäßig messen. Durch die Anwendung des ORC-Prozesses in diesem Leistungsbe-  
reich werden Biomasseheizkraftwerke, welche mit einem ORC-Prozess arbeiten, üblicherweise in

ländlichen Regionen in Betrieb genommen (van Loo, S. und Koppejan J., 2008).

Der elektrische Wirkungsgrad von Biomasseheizkraftwerken mit ORC-Prozess liegt laut unterschiedlichen Quellen im Bereich zwischen 10 und 20 %. Kaltschmitt et al. berichten von Wirkungsgraden von ca. 10 %. Unter optimalen Bedingungen und bei optimierten Anlagen seien aber auch Wirkungsgrade im Bereich von rund 20 % möglich (Kaltschmitt et al., 2009). Laut van Loo und Koppejan sind für optimierte Prozesse elektrische Wirkungsgrade von bis zu 17 % möglich. Diese Wirkungsgrade sind dann teilweise sogar leicht höher als die Wirkungsgrade einer Dampfturbine mit einer ähnlichen Größe (van Loo, S. und Koppejan J., 2008). In einem Bericht des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT) werden zwei Beispielanlagen für Biomasseheizkraftwerke mit ORC-Prozess angeführt. Diese beiden Beispielanlagen erreichen einen elektrischen Wirkungsgrad von 14,5 % bzw. 14,1 %. Mit optimierten Anlagen sind laut BMVIT auch elektrische Wirkungsgrade von bis zu 20,6 % möglich (Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2008). Laut Ulli Drescher kann sich die Stromausbeute, also der elektrische Wirkungsgrad, von den bisher üblichen rund 14 % auf 20 % steigern. Um diese Effizienzsteigerung zu erreichen muss das ORC-Medium mit den besten Eigenschaften für den jeweiligen ORC-Prozess ausgewählt werden. Zusätzlich empfiehlt Drescher einen internen Regenerator, eine Massenstromaufspaltung oder einen zweiten Thermoölkreislauf, eine Luftvorwärmung und eine Erhöhung der oberen Prozesstemperatur (Drescher, 2008). Zusammenfassend lässt sich sagen, dass elektrische Wirkungsgrade von über 17 % durchaus realistisch sind und damit eine höhere Effizienz möglich ist, als bei einem vergleichbar großen Dampfturbinenprozess.

Vor- und Nachteile des ORC-Prozesses im Vergleich zum Dampfturbinenprozess:

- Ein großer Vorteil besteht darin, dass beim ORC-Prozess ein Betrieb ohne Überhitzen möglich ist, da die Expansion von gesättigtem ORC-Mediumdampf einen trockenen Dampf verursacht (siehe Abbildung 2.5: Kondensationslinie geht nach links) (van Loo, S. und Koppejan J., 2008).
- Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass beim ORC-Prozess keine hohen Prozessdrücke notwendig sind. Deshalb gibt es viel weniger Sicherheitsanforderungen. Es muss im Gegensatz zum Dampfturbinenprozess kein Dampfkesselwärter bzw. Dampfturbinenwärter angestellt werden (Drescher, 2008), (Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2008).
- Das gute Verhalten des ORC-Prozesses im Teillastbetrieb ist ein weiterer Vorteil. Bei einer Teillast im Bereich von 30 bis 100 % werden noch immer gute Wirkungsgrade erzielt (van Loo, S. und Koppejan J., 2008), (Drescher, 2008).
- Des Weiteren ist der ORC-Prozess einfach zu betreiben. Er glänzt durch eine gute Regel- und Automatisierbarkeit (Oberberger et al., 2002), (Kaltschmitt et al., 2009), (Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2008).

- Der ORC-Prozess benötigt keinen Dampfkessel. Dieser Vorteil wird jedoch dadurch ausgeglichen, dass stattdessen ein Thermoölkreislauf erforderlich ist. Die Investitions- und Instandhaltungskosten dieser beiden Technologien sind in etwa gleich hoch (van Loo, S. und Koppejan J., 2008), (Kaltschmitt et al., 2009).
- Ein Nachteil des ORC-Prozess ist der hohe Stromverbrauch. Der Eigenbedarf an Strom verhindert bessere Netto-Effizienzen eines Biomasseheizkraftwerks mit ORC-Prozess (van Loo, S. und Koppejan J., 2008).
- Der elektrische Wirkungsgrad von Biomasseheizkraftwerken mit ORC-Prozess wird durch den geringen Kesselwirkungsgrad des Thermoölkessels limitiert (Kaltschmitt et al., 2009). Dennoch sind bei optimierten Biomasseheizkraftwerken mit ORC-Prozessen elektrische Wirkungsgrade erreichbar, die im niedrigen Leistungsbereich mit Wirkungsgraden von Dampfturbinenprozessen konkurrieren können.
- Ein letzter Nachteil betrifft die organischen Arbeitsmedien des ORC-Prozesses. Diese sind oft umwelt- und klimaschädlich und zudem leicht entflammbar (Kaltschmitt et al., 2009).

Die Sicherheitstechnik von Dampfkesseln ist gesetzlich klar und eindeutig geregelt, bei Biomasseheizkraftwerken mit Thermoölkreislauf und ORC sind die Regelwerke weniger konkret. Dies veranschaulicht der folgende Abschnitt (Punkt 2.2).

## 2.2 Normen und Regelwerke für einen Thermoölkreislauf

Für Biomasseheizkraftwerke mit einem Thermoölkreislauf und ORC-Modul existieren keine spezifischen EU-Richtlinien, Gesetze oder Normen die exakt darauf zugeschnitten sind. Es gibt verschiedene rechtliche Quellen, die Vorschriften über den Bau, die Inbetriebnahme und den laufenden Betrieb von Biomasseheizkraftwerken mit Thermoölkreislauf und ORC-Modul liefern. In diesem Kapitel werden die wichtigsten Informationen aus diesen Richtlinien, Gesetzen und Normen zu den Thermoölkreisläufen behandelt und deren Umsetzung am Beispiel des Biomasseheizkraftwerks in Großarl verglichen (R&I-Schema des Thermoölkreislaufs des Biomasseheizkraftwerks in Großarl befindet sich im zweiten Teil des Anhangs).

Da es sich bei einem Biomasseheizkraftwerk mit Thermoölkreislauf und ORC-Modul um eine komplexe Anlage handelt, bei der es etliche Normen zu beachten gibt und diese immer mehr ins Detail gehen (zum Beispiel: DIN 2507 Schrauben und Muttern für Rohrleitungen), werden in dieser Arbeit nur die wichtigsten Normen und Gesetze zu den Thermoölkreisläufen durchleuchtet. Folgende Regelwerke wurden untersucht:

- DIN 4754: Wärmeübertragungsanlagen mit organischen Wärmeträgern
- BGR 500: Betreiben von Arbeitsmitteln; Kapitel 2.27: Wärmeübertragungsanlagen mit organischen Wärmeträgern
- VDI 3033: Wärmeübertragungsanlagen mit organischen Wärmeträgern - Betreiben, Warten und Instandsetzen
- ÖNORM EN 746: Industrielle Thermoprozessanlagen
- ÖNORM EN 50156: Elektrische Ausrüstung von Feuerungsanlagen
- ÖNORM EN 12952: Wasserrohrkessel und Anlagenkomponenten

### 2.2.1 Normen und Regelwerke zur Konstruktion eines Thermoölkreislaufs

Voraussetzung für einen sicheren Betrieb eines Thermoölkreislaufs ist, dass die richtigen Werkstoffe für die einzelnen Bestandteile, die verbaut wurden, verwendet werden. Erhitzer (Thermoölkessel), Wärmeverbraucher (Wärmeübertrager), Rohrleitungen und Gehäuse von Pumpen und Armaturen müssen aus warmfestem Stahl bestehen und die höchstmöglichen Thermoöltemperaturen aushalten, die während dem Betrieb auftreten können. Des Weiteren müssen der Thermoölkessel und die Rohrleitungen mit all ihren Bestandteilen wärme gedämmt ausgeführt sein. Die Anzahl der Verbindungen mit geschweißten Flanschen oder Schweißverbindungen sollte - da diese Schwachstellen im Rohrleitungssystem darstellen - so gering wie möglich gehalten werden. Müssen Rohrleitungen und Rohrleitungsteile miteinander verbunden werden sollten die Verbindungen wenn möglich unlösbar (geschweißt) sein. Flansche sind zu vermeiden (DIN 4754, 1994), (ÖNORM EN 746-2, 2011).

Im Bereich von Flanschen und Armaturen, an denen die Gefahr des Austritts von Thermoöl besteht, ist die Wärmedämmung so auszuführen, dass Undichtheiten erkannt werden können. Die elektrischen Betriebsmittel, wie Leitungen und Schaltgeräte sind in der Nähe von Flanschen und Armaturen - also im potentiellen Gefahrenbereich - so anzubringen, dass sie gegen die Einwirkungen des eventuell austretenden Thermoöls geschützt sind. Dies wird durch eine entsprechende Abdeckung oder eine Verlegung unter Putz erreicht (DIN 4754, 1994). Nach der EN 50265-1 („Allgemeine Prüfverfahren für das Verhalten von Kabeln und isolierten Leitungen im Brandfall - Prüfung der vertikalen Flammenausbreitung an einer Ader oder einem Kabel - Teil 1: Prüfgerät“) dürfen „nur Kabel und Leitungen verwendet werden, die aus Materialien hergestellt sind, die zumindest flammwidrig oder selbstverlöschend sind“ (ÖNORM EN 50156-1, 2005).

Der Thermoölkreislauf des Biomasseheizkraftwerks in Großarl wurde vom Unternehmen Kohlbach Holding GmbH geplant und gebaut. Es wird davon ausgegangen, dass die Kohlbach Holding GmbH die den Normen entsprechenden Werkstoffe verwendet hat und die Anlage gemäß den vorliegenden Normen erbaut worden ist.

Der Thermoölkessel, in dem das Thermoöl erhitzt wird, ist so zu bauen, dass die Wandungen und das Thermoöl zu keiner Zeit an keiner Stelle unzulässig stark erhitzt werden. Befinden sich im Thermoölkessel, wie in der Beispielanlage Großarl, zwei Rohrschlangen, ist besonders darauf zu achten, dass die zulässige Filmtemperatur in den einzelnen Rohren nicht überschritten wird. Dass sich das Thermoöl im Thermoölkessel zu stark erwärmt, wird im Allgemeinen mit Zwanglauf-Erhitzen verhindert. Pumpen sorgen für einen konstanten Durchfluss. Laut DIN 4754 muss der Volumenstrom bzw. die höchste Filmtemperatur bei einem Erhitzer bis zu einer Leistung von 50 kW überwacht, darüber gemessen und angezeigt werden (DIN 4754, 1994). Da die Messung der Filmtemperatur und die Festlegung deren Messstellenposition sehr schwierig ist, wird in der Praxis der Volumenstrom erfasst. Als Sicherheitsvorrichtung bei Zwanglaufanlagen, bei denen durch eine verminderte Strömung eine unzulässige Thermoöltemperatur auftreten kann, muss in den Thermoölkreislauf deshalb eine „**zuverlässige**“ **Strömungssicherung** eingebaut werden, die bei unterschreiten eines Mindest-Durchflusses durch den Erhitzer (Thermoölkessel) die Beheizung abschaltet, verriegelt sowie zusätzlich ein optisches oder akustisches Warnsignal auslöst (Not-Stopp der Feuerung). „Zuverlässig“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Zuverlässigkeit durch eine Typprüfung zu erbringen ist und die Strömungssicherung der DIN 32727 („Strömungssicherungen für Wärmeübertragungsanlagen; Sicherheitstechnische Anforderungen und Prüfung“) entsprechen muss. Diese Strömungssicherung wird im Vorlauf des Thermoölkessels in beiden Rohrschlangen installiert (DIN 4754, 1994). Im Thermoölkreislauf des Biomasseheizkraftwerks Großarl werden zur Strömungssicherung an beiden Rohren am Ausgang des Thermoölkessels die Durchflusssensoren FZA-- 1.910 eingesetzt.

Des Weiteren verlangen die Normen am Ausgang des Thermoölkessels einen „zuverlässigen“ Temperaturregler und einen „**zuverlässigen**“ **Sicherheitstemperaturbegrenzer** nach DIN 3440 („Temperaturregler- und -begrenzungseinrichtungen für Wärmeerzeugungsanlagen; Sicherheitstechnische Anforderungen und Prüfung“). „Die Temperaturregler- und Temperaturbegren-

zungseinrichtungen nach DIN 3440 gelten dann als „zuverlässig“, wenn sie auf Grund einer erfolgreich abgeschlossenen Typprüfung mit dem DIN-Prüf- und Überwachungszeichen und einer zugehörigen Registriernummer gekennzeichnet sind“ (DIN 4754, 1994). In Großarl dient der Temperatursensor TZA+ 1.900 im Thermoölvorlauf als Sicherheitstemperaturbegrenzer.

Um den Thermoölkessel vor zu hohen Temperaturen aus dem Feuerraum zu schützen, muss eine geeignete Sicherheitseinrichtung, wie beispielsweise ein **„zuverlässiger“ Rauchgastemperaturbegrenzer**, eingesetzt werden, der eine thermische Überbelastung des Erhitzers durch Abschaltung der Beheizung sicher verhindert (DIN 4754, 1994). Damit ein Rauchgastemperaturbegrenzer als „zuverlässig“ gilt, muss dieser dieselben Anforderungen wie ein Sicherheitstemperaturbegrenzer erfüllen. Bei der Beispielanlage in Großarl gibt es keinen Rauchgastemperaturbegrenzer der den Thermoölkessel vor zu hohen Temperaturen schützt, eine Installation eines solchen Begrenzers wird deshalb dringend empfohlen.

Es gibt offene Thermoölkreisläufe, die mit der Atmosphäre in Verbindung stehen und geschlossene Thermoölkreisläufe, welche keine Verbindung zur Atmosphäre aufweisen. Bei geschlossenen Anlagen ist am Ausdehnungsgefäß ein **„zuverlässiger“ Druckbegrenzer** einzubauen, der beim Ansprechen die Beheizung abschaltet, verriegelt und ein optisches oder akustisches Warnsignal auslöst (Not-Stopp). Der beim Druckbegrenzer eingestellte Druck muss kleiner als der Ansprechdruck des Sicherheitsventils sein. Die Zuverlässigkeit eines Druckbegrenzers ist durch eine Typprüfung nachzuweisen (DIN 4754, 1994), (ÖNORM EN 12952-7, 2013). Beim Thermoölkreislauf des Biomasseheizkraftwerks in Großarl handelt es sich um einen geschlossenen Thermoölkreislauf, dennoch befindet sich am Ausdehnungsgefäß kein zuverlässiger Druckbegrenzer. Es wird dringend empfohlen diesen Druckbegrenzer am Ausdehnungsgefäß nachzurüsten und diesen mit der Sicherheitskette zu verbinden.

Am bzw. im Ausdehnungsgefäß ist ein **„zuverlässiger“ Flüssigkeitsstandbegrenzer** anzubringen, der beim Unterschreiten des niedrigsten zulässigen Flüssigkeitsstandes die Beheizung selbstständig abschaltet, verriegelt und ein optisches oder akustisches Warnsignal auslöst (Not-Stopp). Ein „zuverlässiger“ Flüssigkeitsstandbegrenzer wurde einer Typprüfung unterzogen und nach DIN 32728 („Füllstandsbegrenzer, Flüssigkeitsstandbegrenzer für Wärmeübertragungsanlagen mit organischen Flüssigkeiten; Sicherheitstechnische Anforderungen und Prüfung“) gebaut (DIN 4754, 1994). Beim Thermoölkreislauf Großarl wurde diese Forderung mit dem Flüssigkeitsstandbegrenzer LZA- 6.2.2.150 im Ausdehnungsgefäß umgesetzt.

Am Ausdehnungsraum muss ein **„zuverlässiges“ Sicherheitsventil** angebracht sein, um vor zu hohen Drücken zu schützen. Steigt der Druck im Thermoölvorlauf unzulässig stark an, öffnet dieses Ventil und das Thermoöl gelangt ohne Umwege in das Ausdehnungsgefäß. „Zuverlässig“ ist das Sicherheitsventil, wenn es einer Typprüfung unterzogen wurde (DIN 4754, 1994). Das Sicherheitsventil welches sich beim Thermoölkreislauf in Großarl am Ausdehnungsgefäß befindet ist auf einen zulässigen Betriebsdruck von 10 bar ausgelegt.

Steigt das Füllvolumen eines Thermoölkreislaufs auf über 1000 Liter, wie im Beispiel von Großarl, muss für die Entleerung ein Sammelgefäß vorhanden sein. Das Sammelgefäß bzw. die Sammelgefäße müssen so dimensioniert sein, dass mindestens das Volumen des größten absperrenbaren Anlagenabschnitts aufgenommen werden kann. Logischerweise sollten die Sammelgefäße möglichst an der tiefsten Stelle der Anlage installiert sein. Das Sammelgefäß bzw. die Sammelgefäße benötigen eine Füllstandsanzeige oder eine Füllstandsprüfmöglichkeit und eine Ablass- und Entlüftungseinrichtung (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, 2008), (DIN 4754, 1994). An den Thermoölkreislauf des Biomasseheizkraftwerks Großarl ist ein Sammelgefäß mit einem Füllvolumen von 10000 Liter angeschlossen. An dieses Sammelgefäß sind eine Füllstandsanzeige und eine Druckanzeige angeschlossen. Ein Sicherheitsventil schützt das Sammel- und Ausdehnungsgefäß vor zu hohem Druck (zulässiger Betriebsdruck: pÜ 0.5 bar) und es existiert eine Ablass- und Entlüftungseinrichtung.

Das Ausdehnungsgefäß muss so konstruiert sein, dass es mindestens die 1,3-fache Volumenzunahme des Füllvolumens zwischen der Fülltemperatur und der zulässigen Betriebstemperatur oberhalb des Mindestfüllstandes aufnehmen kann. An das Ausdehnungsgefäß ist ein Sammelbehälter oder ein offenes Gefäß anzuschließen (DIN 4754, 1994). In der Beispielanlage in Großarl ist das Ausdehnungsgefäß mit dem Sammelgefäß über eine Ausgleichsleitung verbunden. Die Ausgleichsleitung sorgt für einen kontinuierlichen Thermoölaustausch.

Biomasseheizkraftwerke die einen Thermoölkreislauf beheizen, der mit einer Umwälzpumpe angetrieben wird, werden als Zwanglauf-Erhitze bezeichnet. Bei Zwanglauf-Erhitzen müssen zwei Pumpen, eine davon als Reservepumpe, mit ausreichend Leistung vorhanden sein, um eine kontinuierliche Zirkulation zu gewährleisten und somit eine Überhitzung des Thermoöls im Thermoölkessel zu verhindern. Der Antrieb der beiden Pumpen muss von zwei, voneinander unabhängigen, Energiequellen erfolgen. Direkt vor den Umwälzpumpen sind Schmutzfänger mit auswechselbarem Einsatz oder umschaltbare Schmutzfänger einzusetzen (DIN 4754, 1994). Beim Thermoölkreislauf in Großarl werden zwei, redundant ausgeführte, Umwälzpumpen eingesetzt. Vor dem Durchströmen der Umwälzpumpen passiert das Thermoöl einen Schmutzfilter.

Die Brenner (Feuerräume) müssen für das jeweilige Einsatzgebiet geeignet sein und über eine wahrnehmbare Sichtkontrolle (wie beispielsweise Beobachtungsfenster, Schaulöcher,...) verfügen. Die Primär- und Sekundärluftventilatoren (Verbrennungsluftventilatoren) müssen so ausgeführt sein, dass ein Rückströmen von Ofengasen oder Abgas durch die Feuerungsanlage verhindert wird. Die Verbrennungsluftventilatoren müssen mit einem Rückschlagventil ausgerüstet sein, das für den Betriebsdruck geeignet ist (ÖNORM EN 746-2, 2011). Auch diese Forderungen werden vom Thermoölkreislauf in Großarl erfüllt.

### 2.2.2 Normen und Regelwerke zur Inbetriebnahme und zum Betrieb von Thermoölkreisläufen

„Der Besitzer (Unternehmer) des Biomasseheizkraftwerks muss die Angestellten (Versicherten) des Biomasseheizkraftwerks vor der erstmaligen Aufnahme ihrer Tätigkeit und danach in angemessenen Zeitabständen, jedoch mindestens einmal jährlich, über folgende Sachverhalte aufklären:

- die Gefahren und Risiken beim Betrieb der Anlage,
- die Sicherheitsbestimmungen,
- das Verhalten bei Unfällen und Störungen und die in einem solchen Fall zu treffenden Maßnahmen,
- den Inhalt der Betriebsanweisung.

Der Inhalt und der Zeitpunkt einer solchen Unterweisung sind zu dokumentieren und von den Angestellten durch Unterschrift zu bestätigen“ (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, 2008).

Der Hersteller des Thermoölkreislaufs bzw. die Hersteller der verschiedenen Komponenten des Thermoölkreislaufs sind gesetzlich dazu verpflichtet eine Betriebsanleitung mitzuliefern. Diese Betriebsanleitungen sind genau zu befolgen, um ein störungsfreies Betreiben des Thermoölkreislaufs zu garantieren. Die Betriebsanleitung „muss auf die jeweilige Anlage und deren Betriebsbedingungen abgestimmt sein und ein Fließschema, elektrische und mess- und regeltechnische Schaltpläne enthalten“ (Verein Deutscher Ingenieure, 1995).

Der Betreiber des Biomasseheizkraftwerks hat die Aufgabe eine Betriebsanweisung in verständlicher Form und Sprache zu erstellen. Diese Betriebsanweisung muss alle wichtigen Bedienungs-funktionen, die durch die Angestellten erfüllt werden sollen, ausführlich beschreiben und jederzeit zugänglich sein (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, 2008), (Verein Deutscher Ingenieure, 1995).

Das erstmalige Anheizen der Anlage muss laut Betriebsanleitung, vorsichtig, in Schritten und in Gegenwart einer befähigten Person (die Definition einer befähigten Person liefern die Technischen Regeln für Betriebssicherheit (TRBS 1203)) erfolgen. Bevor eine Anlage in Betrieb genommen wird, bzw. nach einer Änderung oder Instandsetzung wieder in Betrieb genommen wird, muss eine befähigte Person eine Dichtheitsprüfung durchführen. „Eine Dichtheitsprüfung muss mit flüssigem, nicht heißem Thermoöl, einem Inertgas oder Luft durchgeführt werden, wobei der zulässige Betriebsdruck der Anlage nicht überschritten werden darf“ (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, 2008). Alle Verbindungen, Anlagenkomponenten und Rohrleitungen sind ständig während der Anheizphase auf ihre Dichtheit zu überwachen und den Herstellervorschriften entsprechend zu behandeln. Vor dem Anheizen der Anlage muss die Ausrüstung bzw. müssen die Ausrüstungsteile auf Vorhandensein, Einstellung und Funktionsfähigkeit überprüft werden (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, 2008). „Alle Sicherheitsfunktionen müssen mindestens

einmal während der Inbetriebnahme geprüft werden“ (ÖNORM EN 746-2, 2011).

Wenn der Thermoölkreislauf in Betrieb genommen wird, darf sich die Beheizung erst dann einschalten lassen, nachdem die Umwälzpumpe eingeschaltet wurde. „Bei einem Kaltstart darf die Strömungssicherung überbrückt werden, bis der Wärmeträger eine Viskosität erreicht hat, die der Einstellung der Strömungssicherung entspricht. Eine Überbrückung darf nur mit einem zusätzlichen, zuverlässigen Temperaturbegrenzer oder einem Stellteil mit selbsttätiger Rückstellung geschehen“ (DIN 4754, 1994), (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, 2008).

Der Lieferant des Thermoöls ist dazu verpflichtet die Sicherheitsdatenblätter (msds - material safety data sheets) der Thermoöllieferung beizulegen. Diese Sicherheitsdatenblätter geben die maximal zulässigen Vorlauftemperaturen an. Laut DIN 4754 sollte die obere Einsatztemperatur so gewählt werden, dass das Thermoöl mindestens ein Jahr betriebsfähig bleibt (DIN 4754, 1994). In der Praxis wird ohnehin versucht die Nutzungsdauer des Thermoöls möglichst hoch zu halten, da das Thermoöl in diesen Mengen einen beachtlichen Kostentreiber darstellt (DIN 4754, 1994), (Verein Deutscher Ingenieure, 1995).

Das Thermoöl muss mindestens einmal jährlich durch eine befähigte Person auf die weitere Verwendbarkeit überprüft werden. Weitere Prüfungen des Thermoöls sind erforderlich nach der Beendigung des Anfahrbetriebs, 3 Monate nach der erstmaligen Inbetriebnahme, 3 Monate nach der Umstellung auf ein anderes Thermoöl, bei Überhitzung des Thermoöls und bei einer Änderung der Betriebsweise. Die Probe des Thermoöls (rund ein Liter) sollte bei der Probenentnahmestelle aus dem Hauptstrom entnommen werden. Das Probengefäß ist direkt nach der Entnahme zu verschließen und bis zur Untersuchung verschlossen zu halten (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, 2008).

Anlagenkomponenten die eine Sicherheitsfunktion erfüllen und durch eine Störabschaltung deaktiviert wurden, müssen nach der Beseitigung des Fehlers manuell rückgesetzt werden. Eine Rücksetzung bzw. eine Entriegelung muss durch die Betätigung eines Tasters oder durch die Betätigung einer Entriegelungseinrichtung erfolgen. Eine automatische Rückstellung ist nicht zulässig. Jede Rückstellung muss dokumentiert werden. So muss beispielsweise ein Stromausfall eine Störabschaltung zur Folge haben (ÖNORM EN 746-2, 2011).

## 2.3 Sicherheitstechnische Systeme und Sicherheits-Integritätslevel

Die Grundlagen zu den Sicherheitstechnischen Systemen (englisch: Safety Instrumented Systems; SIS) liefern die EN 61508 „Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/ elektronischer/ programmierbarer elektronischer Systeme“ Teil 1 bis 7 und die EN 61511 Teil 1 bis 3 „Funktionale Sicherheit - Sicherheitstechnische Systeme für die Prozessindustrie“. Während die EN 61508 Vorschriften für die Gerätehersteller und Gerätelieferanten liefert, richtet sich die EN 61511 an die Planer, Errichter und die Nutzer von Sicherheitstechnischen Systemen (ÖNORM EN 61511-1, 2005). Gemeinsam bilden diese beiden Normen einen Gesamtansatz zur Ermittlung und Realisierung der Sicherheit in einer Industrieanlage.

„Jede Anlage braucht ein Schutzsystem, welches alle Einrichtungen, Geräte und Sicherheitsstromkreise, deren Hauptzweck dem Schutz von Personen, der Anlage und der Umwelt dient, umfasst. Das Schutzsystem beinhaltet alle Komponenten, die für die funktionale Sicherheit der Anlage erforderlich sind“ (ÖNORM EN 746-2, 2011). Die Sicherheit in einer industriellen Anlage hängt von mehreren Faktoren ab. Dazu gehören die Sensorik, der Analog-Eingang, das Logiksystem, der Analog-Ausgang und die Aktorik. Um ein bestimmtes Sicherheits-Integritätslevel (SIL) zu erfüllen, müssen alle Komponenten einen gewissen Sicherheitsstandard aufweisen. Zuerst muss der Sensor die „wahren“ Prozessparameter festhalten. Danach müssen die Signale über den Analog-Eingang, das Logiksystem und den Analog-Ausgang zur Aktorik übermittelt werden. Schließlich ist der Aktor dafür zuständig den „Befehl“ auszuführen. Der Großteil der Gerätehersteller, die zum Schutzsystem gehören, geben Ausfallwahrscheinlichkeiten für ihre Produkte an. Lediglich die Aktorik-Hersteller geben nur ungern Auskunft über die Ausfallwahrscheinlichkeiten, da die Umgebung, in der die Aktorik arbeitet, die Ausfallwahrscheinlichkeit stark beeinflusst. Beispielsweise kann die Ausfallwahrscheinlichkeit in einer sehr staubigen Umgebung, stark von den Herstellerangaben abweichen. Um ein bestimmtes SIL zu erreichen müssen deshalb alle Komponenten des Sicherheitstechnischen Systems (SIS) einen Mindestsicherheitsstandard erfüllen, welcher wiederum vom SIL abhängt.

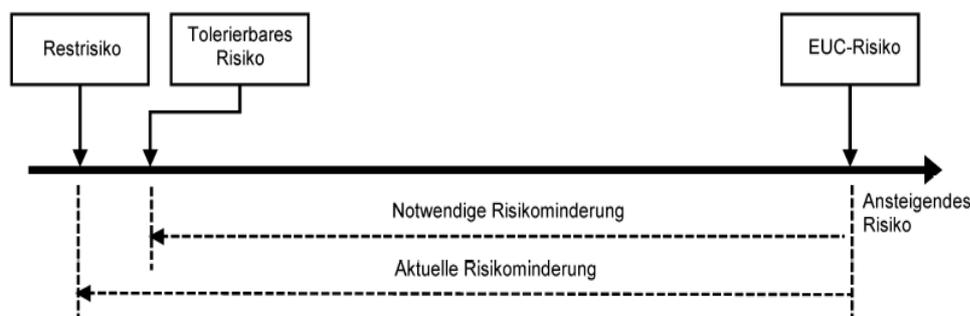
Bevor das SIL festgelegt werden kann, müssen die Gefährdungen und die Risiken analysiert werden. Das Risiko ist eine Kombination aus der Eintrittswahrscheinlichkeit der Gefährdung und der Art bzw. dem Ausmaß des Schadens (ÖNORM EN 61511-3, 2005). In der Praxis werden eine Reihe von Methoden zur Gefährdungs- und Risikoanalyse eingesetzt. Die beliebtesten Methoden sind hier angeführt:

- Sicherheits-Durchsprachen,
- Checklisten,
- Was-wäre-wenn-Analysen,
- Ursache-Wirkungs-Analyse
- Tabellen- und Rastermethoden,

- HAZOP (**HAZ**ard and **OP**erability study)
- FME(C)A (**F**ailure **M**ode **E**ffect (and **C**riticality) **A**nalysis)
- ETA (**E**vent **T**ree **A**nalysis)
- FTA (**F**ault **T**ree **A**nalysis)

(ÖNORM EN 61508-1, 2011) (ÖNORM EN 61511-3, 2005)

Nachdem der Prozess auf sämtliche Risiken untersucht worden ist, kann es sein, dass bestimmte Gefährdungen (entweder aufgrund des Schadensausmaßes, oder wegen der Eintrittswahrscheinlichkeit, oder wegen beiden Kriterien) ein nicht tolerierbares Risiko darstellen. Wenn dem so ist, müssen sicherheitstechnische Funktionen zur Minderung des Risikos implementiert werden. Die folgende Abbildung zeigt das Verhältnis von Restrisiko zum tolerierbaren Risiko.



**Abbildung 2.6:** Restrisiko und tolerierbares Risiko  
abgeänderte Darstellung (ÖNORM EN 61508-5, 2011)

Das EUC-Risiko ist das Risiko einer spezifischen Maschine, eines Prozesses, einer Einrichtung bzw. einer Anlage. Sollte dieses Risiko das tolerierbare Risiko übersteigen, müssen Maßnahmen ergriffen werden, um dieses Risiko zu mindern (notwendige Risikominderung). Diese Risikominderung kann durch unterschiedliche Komponenten bzw. mit einer Kombination von Komponenten erreicht werden. Die tatsächliche Risikominderung ist in der Regel größer als die notwendige Risikominderung. Schlussendlich ist sicherzustellen, dass das verbleibende Restrisiko (die Wahrscheinlichkeit, dass trotz der Schutzvorkehrungen ein gefährlicher Vorfall eintritt) kleiner oder zumindest gleich dem tolerierbaren Risiko ist (Pepperl+Fuchs GmbH, 2007)

Zur Bestimmung der SIL für einen bestimmten Prozess bzw. einer bestimmten Maschine gibt es eine Reihe von Methoden. Die folgenden Methoden werden in den Normen beschrieben:

- „ALARP“-Methode (as low as reasonably possible - das Risiko sollte so niedrig wie vernünftigerweise möglich abgesenkt werden): Diese Methode kann bei der Festlegung der SIL angewendet werden, ist jedoch keine Methode zur Bestimmung von SIL.
- Teilquantitative Methode: Kommt vor allem dann zum Einsatz wenn das tolerierbare Risiko als numerischer Wert angegeben wird.

- Matrixmethode für die Schutzebenen: Die Methode der Risikomatrix kann angewendet werden um durch Kombination der Wahrscheinlichkeit und der Einstufung der Schwere der Auswirkung, gefährliche Ereignisse zu ermitteln.
- Teilqualitativer Risikograph: Das Risiko ist die Kombination der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Schadens und seiner Schwere. Verschiedene Parameter werden mit numerischen Werten kombiniert.
- Qualitativer Risikograph: Das Risiko ist die Kombination der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Schadens und seiner Schwere. Verschiedene Parameter werden qualitativ bestimmt.
- Analyse der Schutzebenen (LOPA - Layer of Protection Analysis): Diese Methode baut auf den Daten der HAZOP-Studie auf. Jede eruierte Gefährdung wird betrachtet und deren Auslöser und die Schutzebenen werden dokumentiert.

(ÖNORM EN 61511-3, 2005), (ÖNORM EN 61508-5, 2011)

Nach der Durchführung der Gefährdungs- und Risikoanalyse wurden die Prozesse bzw. Maschinen identifiziert, welche eine Risikominderung benötigen. Den Bereich zwischen dem tolerierbaren Risiko und dem EUC-Risiko gilt es mit Sicherheitsanforderungen auszulöschen. Diese Sicherheitsanforderungen werden in spezifische sicherheitstechnische Funktionen aufgeteilt und dienen dazu das tolerierbare Risiko zu erreichen. Die sicherheitstechnischen Funktionen beinhalten den kompletten Sicherheitskreis von der Sensorik bis zur Aktorik. Für diese sicherheitstechnischen Funktionen wird ein Maß für die Zuverlässigkeit angegeben. Das Maß für die Zuverlässigkeit sind die Sicherheits-Integritätslevel (SIL), die eine Aussage darüber zulassen, in wie weit man darauf vertrauen kann, dass eine sicherheitstechnische Einrichtung innerhalb eines festgelegten Zeitraumes die korrekte Funktion erbringt, wenn diese benötigt wird. (ÖNORM EN 61511-1, 2005).

Entscheidend für die sicherheitstechnischen Funktionen sind demnach die Ausfallswahrscheinlichkeiten aller Komponenten im Sicherheitskreis. Abhängig von der sicherheitstechnischen Funktion werden die SIL in zwei Klassen eingeteilt.

- Sicherheitstechnische Funktionen, die bei Bedarf aktiviert werden. Die Ausfallswahrscheinlichkeit der Funktion im Bedarfsfall wird angegeben (Anforderungsbetriebsart).
- Sicherheitstechnische Funktionen, die ständig aktiv sind. Die Wahrscheinlichkeit eines Gefahr bringenden Ausfalls innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne (eine Stunde) wird angegeben (Betriebsart mit kontinuierlicher Anforderung).

Aufgrund der zuvor durchgeführten Gefährdungs- und Risikoanalyse wurden die entsprechenden SIL für die sicherheitstechnischen Funktionen festgelegt. Die SIL schreiben die Ausfallswahrscheinlichkeiten für alle Komponenten der sicherheitstechnischen Funktion vor. Die von den SIL verlangten Ausfallswahrscheinlichkeiten sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

SIL-Einstufung: Ausfalls- bzw. Versagenswahrscheinlichkeit der sicherheitstechnischen Funktion im Anforderungsfall und bei kontinuierlicher Anforderung pro Stunde

SIL	im Anforderungsfall	bei kontinuierlicher Anforderung
1	$\geq 10^{-2}$ bis $<10^{-1}$	$\geq 10^{-6}$ bis $<10^{-5}$
2	$\geq 10^{-3}$ bis $<10^{-2}$	$\geq 10^{-7}$ bis $<10^{-6}$
3	$\geq 10^{-4}$ bis $<10^{-3}$	$\geq 10^{-8}$ bis $<10^{-7}$
4	$\geq 10^{-5}$ bis $<10^{-4}$	$\geq 10^{-9}$ bis $<10^{-8}$

**Tabelle 2.1:** SIL mit den zulässigen Ausfallswahrscheinlichkeiten

modifizierte Darstellung nach (Pepperl+Fuchs GmbH, 2007) und (ÖNORM EN 61511-1, 2005)

Je höher die Gefahren eines Prozesses bzw. eines Anlagenbereichs in der Gefährdungs- und Risikoanalyse eingestuft werden, desto höher ist das SIL. Die Einstufung eines Prozesses bzw. eines Anlagenbereichs in eine bestimmte SIL-Kategorie gibt dann die Ausfallswahrscheinlichkeit der verschiedenen Komponenten der sicherheitstechnischen Funktion vor. Wird beispielsweise das EUC-Risiko eines Prozesses bzw. eines Anlagenbereichs auf SIL 1 eingestuft, müssen alle Komponenten der sicherheitstechnischen Funktion eine bestimmte Ausfallswahrscheinlichkeit vorweisen (bei sicherheitstechnischen Funktionen mit Anforderungsbetriebsart muss die Versagenswahrscheinlichkeit der Funktion im Anforderungsfall zwischen 1 und 10 % liegen; bei sicherheitstechnischen Funktionen mit kontinuierlicher Anforderung muss die Wahrscheinlichkeit eines Gefahr bringenden Versagens pro Stunde zwischen 0,00001 und 0,000001 % liegen). Dies beginnt mit der Sensorik und endet mit der Aktorik, alle Komponenten müssen SIL 1 Anforderungen entsprechen. Wenn ein Prozess bzw. ein Anlagenbereich keine Sicherheitsanforderungen oder keine speziellen Sicherheitsanforderungen benötigt, reicht eine Ausfallswahrscheinlichkeit die über SIL 1-Niveau liegt. Die SIL 1, 2 und 3 können allein durch Prozessleittechnik-Schutzeinrichtungen abgedeckt werden, während das SIL 4 weitere Maßnahmen bzw. Schutzeinrichtungen benötigt (ÖNORM EN 61511-3, 2005).



### 3 Fragestellung

Ziel dieser Arbeit ist, wie der Titel schon sagt, die „sicherheitstechnische Bewertung von Thermoölkreisläufen bei Biomasseheizkraftwerken“. Im Zuge dieser sicherheitstechnischen Bewertung soll aufgedeckt werden, von welchen Elementen bzw. Komponenten des Thermoölkreislaufs die größte Gefahr ausgeht. Zusätzlich soll herausgefunden werden wie es zu gefährlichen Situationen kommen kann. Worin die Ursachen für gefährliche Situationen liegen und welche Konsequenzen dabei zu befürchten sind.

Um diese Punkte erfolgreich und ausführlich beantworten zu können werden zwei Methoden, die im folgenden Kapitel „Material und Methoden“ genauer beschrieben werden, angewendet. Zum einen wurden die möglichen Abweichungen, mit deren Ursachen und Konsequenzen, vom Normalbetrieb im Zuge einer HAZOP-Studie aufgearbeitet, zum anderen wurde mit Experteninterviews versucht die Ursachen von bisherigen Schadensfällen in Zusammenhang mit Thermoölkreisläufen aufzudecken.

Das Ziel dieser Arbeit ist es auf folgende Fragen eine Antwort zu finden:

1. **Welches sind die gefährlichen Szenarien, die zu unkontrollierbaren Situationen führen?**
2. **Decken sich die bisherigen Unfälle mit den Ergebnissen der HAZOP-Studie?**
3. **Von welchen Elementen bzw. Komponenten des Thermoölkreislaufs geht die größte Gefahr aus?**
4. **Sind die gesetzlichen vorgeschriebenen Sicherheitsmaßnahmen ausreichend für einen sicheren Betrieb eines Biomasseheizkraftwerks mit Thermoölkreislauf?**
5. **Können die Gefahrenquellen eliminiert werden?**



## 4 Material und Methoden

In dieser Arbeit wurden zur sicherheitstechnischen Bewertung von Thermoölkreisläufen in Biomasseheizkraftwerken zwei Methoden angewandt. Zum einen wurde eine HAZOP-Studie durchgeführt, mit der sicherheitstechnisch kritische Zustände bzw. Abweichungen eruiert werden konnten. Des Weiteren wurden drei Experteninterviews mit Personen durchgeführt, die bereits bei einem Brand in einem Biomasseheizkraftwerk mit Thermoölkreislauf dabei waren, bzw. genaue Informationen darüber haben.

### 4.1 Allgemeine Informationen zur HAZOP-Studie und den Experteninterviews

In diesem Kapitel werden der allgemeine Ablauf und die Theorie der HAZOP-Studie beschrieben. Es wird erklärt wie eine HAZOP-Studie aufgebaut ist, wie sie funktioniert und was es dabei zu beachten gibt. Zusätzlich wird im zweiten Teil dieses Kapitels die Systematik der Experteninterviews erläutert.

#### 4.1.1 Die Theorie zur HAZOP-Studie

Die HAZOP-Studie (**h**azard and **o**perability study), im deutschsprachigen Raum womöglich besser als PAAG-Verfahren bekannt (**P**rognose, **A**uffinden der Ursache, **A**bschätzen der Auswirkungen, **G**egenmaßnahmen), kommt aus dem Bereich der Chemie und wurde entwickelt um potentielle Gefahren und Gründe für Produktionsabweichungen zu identifizieren.

##### 4.1.1.1 Die historische Entwicklung der HAZOP-Studie

Die erste HAZOP-Studie, die nicht nur eine kritische Untersuchung war, sondern bereits Elemente der heute bekannten HAZOP-Studie enthielt, wurde von der HOC (Heavy Organic Chemicals division) der ICI (Imperial Chemical Industries) im Jahre 1963 durchgeführt. Dabei untersuchten drei Experten der HOC-Abteilung das Design einer Industrieproduktionsanlage der ICI in der Phenol und Aceton produziert wurden. Im Zuge dieser Untersuchung konnten zahlreiche potentielle Gefahren und Verfahrensprobleme aufgedeckt werden, die im Vorhinein noch nicht abzusehen waren (Kletz, 1997).

In den darauf folgenden Jahren ereigneten sich einige große, katastrophale Chemieunfälle, die hier chronologisch und in aller Kürze erwähnt werden.

- Feyzin, Frankreich (1966): Bei der Explosion eines Flüssiggastanks sterben 17 Personen und 80 weitere Personen werden verletzt.

- Flixborough, Großbritannien (1974): Der schlimmste Unfall in der Geschichte der Chemieindustrie Großbritanniens, bei dem 28 Menschen sterben und die gesamte Anlage zerstört wird. In einer Nylonfabrik zerreißt ein Rohr, das vorrübergehend einen beschädigten Reaktor ersetzt, und dabei treten rund 50 Tonnen heiße, entflammbare Flüssigkeit aus, welche sofort verdampft und explodiert.
- Beek, Niederlande (1975): Aus einer Chemiefabrik austretendes Propylen entzündet sich und explodiert, dabei sterben 14 Personen.
- Seveso, Italien (1976): Während der Herstellung von 2,4,5-trichlorophenol in einer Chemiefabrik in Norditalien, kommt es zu einem Zwischenfall bei dem eine Giftwolke austritt, die große Landstriche kontaminiert und etliche Tiere tötet. In Zuge dieses Unglücks wurde die „Richtlinie 82/501/EWG des Rates vom 24. Juni 1982 über die Gefahren schwerer Unfälle bei bestimmten Industrietätigkeiten“, besser bekannt als SEVESO I-Richtlinie, erlassen. Im Laufe der Zeit wurde die SEVESO I-Richtlinie mit der SEVESO II-Richtlinie und der SEVESO III-Richtlinie ergänzt und erweitert.
- Bhopal, Indien (1984): In einer Pestizidfabrik in Indien wird ein Lagertank, der mit Methyl-Isocyanat gefüllt ist (eine sehr giftige Flüssigkeit), mit Wasser kontaminiert. Es kam zu einer Abfolge von chemischen Reaktionen. Dies führte im Endeffekt zu einer Freisetzung von dutzenden Tonnen von Methyl-Isocyanatdampf. Mehrere tausend Menschen wurden durch die Giftwolke getötet und Hunderttausende wurden verletzt.

(Kletz, 2006), (Dunjó Denti, sa)

Diese katastrophalen Chemieunfälle führten zu einem größeren Verlangen nach mehr Sicherheit im Kreise der Bevölkerung. Die Politik reagierte darauf und verabschiedete eine Reihe von Gesetzen, Richtlinien, Normen und Standards - alle mit dem einen Ziel, die Sicherheit in Industrieanlagen zu erhöhen.

Im Jahre 1973 präsentierte Herbert Lawley die erste öffentliche Publikation zum Thema HAZOP-Studie (Lawley, 1974). Die HAZOP-Methodik erweckte die Aufmerksamkeit von vielen Unternehmen aus der Industrie und der Verfahrenstechnik, die dann diese Methodik adaptierten. Seit den 70er Jahren hat sich die Methodik bemerkenswerterweise kaum verändert. Sie wurde lediglich für bestimmte Branchen angepasst, das Grundgerüst ist jedoch gleich geblieben (Kletz, 1997).

### 4.1.1.2 Die Phasen der HAZOP-Studie

Großbritannien kann gut und gerne als die Wiege der HAZOP-Studie bezeichnet werden. Wie zuvor erwähnt, hatte ein britisches Unternehmen im Jahre 1963 die erste HAZOP-Studie durchgeführt. Aufgrund der Flixboroughkatastrophe wurde in den darauf folgenden Jahren vermehrt auf Risikoerkennungs- und Risikovermeidungstechniken zurückgegriffen. Im Zuge dessen steigerte sich die Bekanntheit der HAZOP-Studie, welche in immer mehr Bereichen Anwendung fand,

sodass schließlich sogar die nationale britische Normungsorganisation British Standard Anwendungsregeln zur Durchführung von HAZOP-Studien veröffentlichte (BS IEC 61882: Hazard and operability studies (HAZOP studies) - Application guide).

Die Norm des British Standard beschreibt die HAZOP-Studie als „strukturierte und systematische Technik zur Untersuchung eines definierten Systems, mit dem Ziel:

- potentielle Gefahren im System zu identifizieren und
- die Gründe für betriebliche Störungen und Produktionsabweichungen, die zu nicht-konformen Produkten führen, aufzudecken.“

(British Standard, 2001)

Eine HAZOP-Studie wird üblicherweise in drei Phasen unterteilt:

1. Pre-meeting Phase
2. Meeting Phase
3. Post-meeting Phase

(Rossing N.L. et al., 2009)

### **Pre-meeting Phase**

Wie der Name schon verrät, findet diese Phase vor dem eigentlichen Meeting/dem HAZOP-Dialog statt. In der Regel ist es der/die Moderator/in (englisch: Study leader) der die Studie organisiert und alle Vorbereitungen für das Meeting trifft. In dieser Phase werden die Ziele und der Nutzen der Studie definiert. Der/die Moderator/in sammelt Informationen über den Prozess bzw. die zu untersuchende Einrichtung. Dabei organisiert er/sie Flussdiagramme, R&I-Schemata, Anlagenschemata, Sicherheitsdatenblätter (msds), etc. Er/sie macht einen Vorschlag zur Unterteilung der Anlage in zu untersuchende Sektionen und identifiziert relevante Prozessvariablen und mögliche Abweichungen vom Sollzustand. Des Weiteren sucht er/sie passende Teilnehmer/innen für die HAZOP-Studie und prüft deren Verfügbarkeit. Nachdem er/sie einen Zeitplan erstellt und diesen den Teilnehmern vorgelegt hat, ist die Pre-meeting Phase beendet.

### **Meeting Phase**

Zu Beginn des Meetings stellt der/die Moderator/in kurz die Technik und die Regeln der HAZOP-Studie vor. Bevor der erste Bereich analysiert wird werden noch die Systemgrenzen festgelegt. Dabei wird festgehalten, welche Teile des Systems bzw. des Prozesses noch in der HAZOP-Studie durchgearbeitet werden und welche nicht. Danach werden die einzelnen Sektionen und Abweichungen vom Sollzustand in einer Diskussion abgearbeitet. Der/die Moderator/in sorgt dafür, dass alle Prozessvariablen und Abweichungen strukturiert und vollständig besprochen

werden, dass zu überprüfende Punkte, noch offene Punkte oder Empfehlungen notiert werden, dass die dafür verantwortlichen Personen festgelegt werden und die HAZOP-Studie im Zeitplan bleibt.

### Post-meeting Phase

Während der HAZOP-Studie wurden Punkte notiert, bei denen Nachbesserungen notwendig sind. Die verantwortlichen Personen beginnen direkt nach der HAZOP-Studie diese Punkte abzuarbeiten. Die Ergebnisse der Nachbesserungen werden dem/der Moderator/in weitergeleitet. Möglicherweise wird das HAZOP-Team ein weiteres Meeting festsetzen, bei dem der Status aller Aktionspunkte besprochen wird und darüber entschieden wird, ob noch weitere Maßnahmen ergriffen werden müssen. (Rossing N.L. et al., 2009)

#### 4.1.1.3 Die Auswahl der richtigen Teilnehmer

Bereits bei der Auswahl der Teammitglieder wird die Qualität der späteren Ergebnisse entscheidend beeinflusst. Die HAZOP-Studie ist eine Teamarbeit, bei der jedes Teammitglied für eine bestimmte Rolle ausgewählt wird. Das Team sollte so klein wie möglich sein, jedoch möglichst viele relevante technische und operative Fähigkeiten und Erfahrungen mitbringen. In der Regel sind in einem HAZOP-Team zwischen vier und sieben Personen. Je größer das Team ist, desto langsamer ist der Arbeitsfortschritt (British Standard, 2001).

Nachfolgend werden die Personen und deren Rollen mit den jeweiligen Eigenschaften und Aufgaben aufgelistet, die in einer HAZOP-Studie partizipieren sollen.

- **Moderator/in (study leader):** Er/Sie hat die Erfahrung und das Wissen wie eine HAZOP-Studie zu leiten ist. Er/Sie ist für die Kommunikation zwischen Projektmanagement und HAZOP-Team verantwortlich. Neben der Planung der Studie, der Zusammensetzung des Teams, schlägt er/sie auch sinnvolle Kombinationen von Leitworten und Prozessparametern vor. Er/Sie ist für die Durchführung der Studie zuständig und dokumentiert die Ergebnisse.
- **Schriftführer/in (Recorder):** Er/Sie dokumentiert die Fortschritte der Meetings, die entdeckten Gefahren, die identifizierten Problemzonen, die Verbesserungsvorschläge und die Nachfolgeaktivitäten. Er/Sie assistiert zusätzlich dem Moderator in der Planung der Studie und den administrativen Tätigkeiten.
- **Anlagenplaner/in:** Er/Sie erklärt die Konstruktion und die Funktionsweise der Anlage. Er/Sie liefert Erklärungen darüber, wie eine definierte Abweichung auftauchen kann und wie das System darauf reagiert.
- **Betreiber/in:** Er/Sie erklärt wie das betrachtete System verwendet wird und beschreibt die betrieblichen Auswirkungen von Abweichungen und inwieweit diese Abweichungen gefährlich sein könnten.

- **Spezialist/in:** Er/Sie bringt das relevante Expertenwissen zum System bzw. zum Prozess in die Studie ein.
- **Instandhalter/in:** Wenn es nötig sein sollte oder relevante Informationen verspricht, kann noch ein/e Instandhalter/in in das Team aufgenommen werden.

(British Standard, 2001)

#### 4.1.1.4 Der systematische Ablauf der HAZOP-Studie

Dieses Unterkapitel beschäftigt sich mit der „meeting phase“ und beschreibt den Ablauf der HAZOP-Diskussion. Der/die Moderator/in hat einen passenden Raum zur Durchführung der HAZOP-Studie organisiert, die nötigen Schemata, Sicherheitsdatenblätter und Informationen liegen bereit und die Teilnehmer haben sich eingefunden. Nach einer kurzen Einführung in die Funktionsweise der HAZOP-Studie, wird der erste Bereich bzw. der erste Punkt des Prozesses untersucht.

Bei einer HAZOP-Studie werden sämtliche Abweichungen vom Sollzustand und deren Auswirkungen und Konsequenzen untersucht. Der Sollzustand ist jener Zustand bei dem alles planmäßig abläuft. Um möglichst vollständig und systematisch alle potentiellen Abweichungen in einem Prozessbereich zu erfassen werden Leitworte verwendet. Folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Leitworte und deren Bedeutung:

Leitwort	Bedeutung
kein	Verneinung des Planvorhabens
mehr von	quantitative Zunahme
weniger von	quantitative Abnahme
sowohl als auch	qualitative Zunahme
teilweise	qualitative Abnahme
umgekehrt	logisches Gegenteil des Planvorhabens
anders als	komplette Auswechslung

**Tabelle 4.1:** Leitwörter und deren Bedeutung  
(British Standard, 2001)

Diese Leitworte werden dann mit den unterschiedlichen Prozessparametern in Verbindung gesetzt bzw. kombiniert. Prozessparameter könnten die Folgenden sein:

- Durchfluss
- Druck
- Temperatur
- Pegel
- Mischung

- Zusammensetzung
- Reinheit
- Zeit
- ph-Wert
- Viskosität
- Heizwert
- ...

So wird beispielsweise das Leitwort „kein“ mit dem Prozessparameter „Durchfluss“ kombiniert und das Resultat der Abweichung ist „kein Durchfluss“. Dann werden systematisch sämtliche Leitwörter, die Sinn machen, mit dem Prozessparameter „Durchfluss“ kombiniert. Wenn alle sinnvollen Kombinationen von Leitwörtern mit dem Prozessparameter „Durchfluss“ durchgegangen wurden, wendet man sich dem nächsten Parameter, wie beispielsweise „Temperatur“, zu. Sind alle Leitwörter und Prozessparameter kombiniert, widmet man sich dem nächsten Prozessbereich.

Bei allen Abweichungen vom Sollzustand diskutiert das HAZOP-Team über mögliche Ursachen der Abweichung, die Konsequenzen der Abweichung und die Sicherheitseinrichtungen, welche die Ursache davon abhalten zur Konsequenz zu werden. Wichtig ist es anzumerken, dass die spezifizierten Konsequenzen voraussetzen, dass das aktive Schutzsystem fehlschlägt. Das bedeutet, dass eine Argumentation, wie zum Beispiel: „Das kann nicht passieren, weil wir da einen Sicherheitstemperaturbegrenzer haben“, nicht zulässig ist. Wenn die Ursachen und Konsequenzen signifikant und die Sicherheitseinrichtungen ungenügend sind sollte das Team Nachbesserungen vorschlagen. Gleichzeitig werden die für die Nachbesserungen verantwortlichen Personen bestimmt.

Jede Prozessabweichung wird vom/von der Schriftführer/in direkt während der laufenden HAZOP-Studie in ein vorgefertigtes Arbeitsblatt eingetragen. Zum besseren Verständnis folgt auf der nachfolgenden Seite eine Abbildung eines beispielhaften Arbeitsblattes (einer HAZOP-Studientabelle) aus der Norm IEC 61882 von British Standard, die in die deutsche Sprache übersetzt und etwas abgeändert wurde (British Standard, 2001).

Beispiel einer HAZOP-Studententabelle

<b>Titel der HAZOP-Studie:</b> Prozessbeispiel			<b>Datum:</b> 17.11.2013				<b>Seite 1</b>		
<b>Teamzusammensetzung:</b>			LB, DH, EK, NE, MG, JK				<b>Datum Meeting:</b> 15.11.2013		
<b>untersuchter Gegenstand:</b>			<b>Transfer vom Vorratstank A zum Reaktor</b>						
<b>Sollzustand:</b>			<b>Material:</b> A	<b>Aktivität:</b>	kontinuierlicher Transfer mit einer größeren Rate als B	<b>Quelle:</b>	Tank für A	<b>Ziel:</b>	Reaktor
<b>Nr.</b>	<b>Leitwort</b>	<b>Prozessschritt</b>	<b>Abweichung</b>	<b>Ursache</b>	<b>Konsequenzen</b>	<b>Schutzvorrichtungen</b>	<b>Kommentar</b>	<b>benötigte Aktionen</b>	<b>Verantwortlichkeit</b>
1	kein	Material A	kein Material A	Vorratstank A ist leer	kein Fluss von A in den Reaktor; Explosion	keine	Situation nicht akzeptabel	Installation eines Mindestniveaustandsmelder im Vorratstank A	MG
2	kein	Transfer A (Rate größer als B)	kein Transfer von Material A findet statt	Pumpe kaputt; Förderlinie blockiert	Explosion	keine	Situation nicht akzeptabel	Messung der Flussrate für Material A plus eine weitere Pumpe B, falls die Pumpe A ausfällt	JK
3	mehr	Material A	mehr Material A: Vorratstank zu voll	Überfüllung durch den Tanklastwagen	Tank wird überlaufen	keine	Notiz: dies müsste bei einer Untersuchung des Tanks identifiziert werden	Höchstniveaustandsmessgerät einbauen	EK
4	weniger	Material A	weniger Material A	niedriges Level im Vorratstank	schlechter Fluss; möglicher Unterdruck im System	keine	inakzeptabel, dasselbe wie Punkt 1	Mindestniveaustandsmelder im Tank A (siehe Punkt 1)	MG

**Tabelle 4.2:** Beispiel einer HAZOP-Studententabelle  
(British Standard, 2001)

### 4.1.1.5 Der Output einer HAZOP-Studie und die Vor- und Nachteile dieser Technik

In vielen Fällen ist eine HAZOP-Studie der erste Schritt, um die Sicherheit einer Anlage bzw. eines Prozesses zu verbessern. Üblicherweise wird eine HAZOP-Studie während der Planungsphase einer Anlage bzw. eines Prozesses durchgeführt. Es ist jedoch auch möglich diese während dem bereits laufenden Betrieb durchzuführen. Mit den Ergebnissen kann dann eine Anlage bzw. ein Prozess noch sicherheitstechnisch „nachgerüstet“ werden. Eine erfolgreich abgeschlossene HAZOP-Studie liefert die folgenden Outputs:

- eine Prioritätenliste für eine detaillierte Risikoanalyse
- stellt erste Informationen von potentiellen Gefahren, deren Ursache und deren Konsequenzen zur Verfügung
- zeigt Wege, wie Gefahren verhindert werden können
- bildet die Basis für nachfolgende Schritte im gesamten Risikomanagementprogramm

(Khan and Abbasi, 1998)

Die Vorteile der HAZOP-Technik

- Die systematische Suche nach Abweichungen: Dadurch wird die Möglichkeit, dass etwas vergessen wird minimiert.
- Teamarbeit: Die gemeinsame Suche nach Abweichungen, deren Ursache und deren Konsequenzen liefert wesentlich bessere Ergebnisse als eine Befragung jedes Einzelnen. Jeder Teilnehmer bringt seine Erfahrung ein und hat unterschiedliche Sichtweisen.
- Liefert sowohl sicherheitstechnische als auch operationale Ergebnisse.
- Bildet die Grundlage für weiterfolgende sicherheitstechnische Maßnahmen und Programme.
- Die Technik der HAZOP-Studie ist leicht erklärt und wird von den Teilnehmern schnell verstanden.
- Es existiert bereits eine Software, welche die HAZOP-Studie unterstützt.

Selbstverständlich stößt die HAZOP-Studie auch in bestimmten Bereichen an ihre Grenzen bzw. hat nicht zu übersehende Nachteile.

- Die HAZOP-Studie versucht nur Abweichungen vom Sollzustand zu identifizieren, der Sollzustand hingegen wird nicht hinterfragt.
- Man benötigt für die HAZOP-Studie ein gut definiertes System, bei der alle Aktivitäten eindeutig und verständlich sind.
- Die HAZOP-Technik braucht sehr viel Zeit und Einsatz der Teilnehmer/innen.

- Die Qualität der Studie hängt stark von der Erfahrung und der Ernsthaftigkeit der Teilnehmer/innen ab.
- Die HAZOP-Studie betrachtet immer nur eine Abweichung und eine Ursache.

(Khan and Abbasi, 1998)

Trotz dieser Limits bleibt die HAZOP-Studie die beliebteste Technik zur Identifikation und Beurteilung von Gefahren (Khan and Abbasi, 1998).

#### 4.1.2 Die Theorie zu den Experteninterviews

Beim Experteninterview handelt es sich um eine Primärforschung, bei der neue Daten erhoben werden. Dafür werden beispielsweise Methoden der qualitativen Datenerhebung herangezogen.

Das Experteninterview hat eine lange Tradition. Bereits vor tausenden von Jahren lehrte beispielsweise ein Waffenschmied seinem Lehrling sein Handwerk. Die Fragen, die der Lehrling dabei stellte, könnte man als Expertenbefragung bzw. als ein Experteninterview ansehen. Das Experteninterview ist somit eine ganz natürliche Methodik um sich Wissen aus der Erfahrung von anderen, erfahreneren Menschen, anzueignen. In den letzten Jahrzehnten sind viele Lehrbücher erschienen die sich der Methodik der Experteninterviews widmen. Dadurch ist es zu einer Standardisierung der Methodik „Experteninterview“ gekommen.

Ein Experteninterview kann sowohl schriftlich als auch mündlich durchgeführt werden und der dabei verwendete Fragebogen kann standardisiert, grob standardisiert oder gar nicht standardisiert sein. Für welche Art der Durchführung man sich entscheidet, bzw. wie hoch der Grad der Standardisierung ist, hängt von unterschiedlichen Faktoren, wie der verfügbaren Zeit bzw. dem verfügbaren Budget, der Thematik des Interviews, dem Wissen des Interviewers, etc. ab.

Die Besonderheit eines Experteninterviews besteht darin, dass nicht die Gesamtperson, mit ihrer Orientierung und Einstellung, Gegenstand der Analyse ist, sondern das Expertenwissen bzw. Insiderwissen im Mittelpunkt der Analyse steht (Meuser and Nagel, 2002). Deshalb ist die Auswahl der „richtigen“ Experten essentiell und Bedarf größter Sorgfalt.

## 4.2 Praktische Umsetzung der HAZOP-Studie und der Experteninterviews

Nachdem die allgemeine Vorgehensweise und die Theorie der HAZOP-Studie und der Experteninterviews dargelegt wurden, wird in diesem Kapitel deren praktische Umsetzung dargestellt.

### 4.2.1 Umsetzung der HAZOP-Studie

Die HAZOP-Studie, die als Grundlage für diese Arbeit dient, wurde am Beispiel des Thermoölkreislaufes des Biomasseheizkraftwerks Großarl durchgeführt. Der dritte Kessel des Heizkraftwerks Großarl, der einen Thermoölkreislauf erhitzt und Gegenstand der Ermittlung war, wurde im Jahr 2005 in Betrieb genommen. Das bedeutet, dass die HAZOP-Studie während des Betriebs, und nicht wie üblich während der Planungsphase, durchgeführt wurde.

Die HAZOP-Studie wurde als Methode zur Gefährdungs- und Risikoanalyse eingesetzt, um darauf aufbauend Sicherheits-Integritätslevel (SIL) für bestimmte Prozesse bzw. Anlagenbereiche festzulegen. Die SIL verlangen eine bestimmte Zuverlässigkeit von den sicherheitstechnischen Funktionen. Eine ausführlichere Erklärung zu den sicherheitstechnischen Systemen und den SIL befindet sich in Kapitel 2.3.

#### 4.2.1.1 Pre-meeting Phase

Nach der Entscheidung eine HAZOP-Studie zur sicherheitstechnischen Bewertung von Thermoölkreisläufen bei Biomasseheizkraftwerken durchzuführen, um so die sicherheitstechnisch kritischen Komponenten zu eruieren, wurde der Kontakt zu Herrn Dipl.-Ing. Dr. Albert Zschetzsche aufgebaut. Herr Zschetzsche leitet ein technisches Büro für Maschinenbau und Verfahrenstechnik in Linz und hatte bereits Erfahrung mit der Durchführung von HAZOP-Studien. Er sollte die Rolle des Moderators übernehmen.

Da die HAZOP-Studie auch Grundlage für diese Arbeit ist, wurde ich, Stefan Huber, vom Moderator zum Schriftführer ernannt und bereits stark in die Planung der HAZOP-Studie mit eingebunden. Der Nutzen der HAZOP-Studie war es, die sicherheitstechnisch gefährlichen Situationen und Komponenten im Thermoölkreislauf zu bestimmen, mitsamt den Ursachen der gefährlichen Abweichungen und deren Konsequenzen. Der Moderator beauftragte den Schriftführer, die notwendigen Unterlagen für die Studie zu organisieren. Der Schriftführer organisierte das R&I-Schema des Thermoölkreislaufs und weitere Unterlagen wie etwa das Sicherheitsdatenblatt des verwendeten Thermoöls „Therminol 66“. Des Weiteren wurde eine etwas modifizierte HAZOP-Studientabelle vom Schriftführer erstellt, in die, während der Studie, laufend die Ergebnisse eingetragen wurden. Die HAZOP-Studientabelle befindet sich im ersten Teil des Anhangs. Der Thermoölkreislauf wurde nicht in zu untersuchende Sektionen unterteilt, da die Komplexität beschränkt ist und deshalb der gesamte Thermoölkreislauf als eine Sektion bzw. ein Bereich angesehen wurde.

Der Moderator und der Schriftführer der Studie wählten in weiterer Folge gemeinsam die Teilnehmer der HAZOP-Studie aus. Die partizipierenden Teilnehmer mit ihren Rollen waren:

- Moderator: Dipl.-Ing. Dr. Albert Zschetzsche, Geschäftsführer von: Dipl.-Ing. Dr. Albert Zschetzsche, Technisches Büro für Maschinenbau und Verfahrenstechnik
- Schriftführer: Stefan Huber, Student an der Universität für Bodenkultur Wien und Diplomat bei VOIGT+WIPP Engineers GmbH
- Betreiber: Ing. Oliver Rückl, Mitarbeiter von Öko Energiemanagement GmbH Planung und Betriebs GmbH
- Betreiber: Andreas Hettegger, Heizwart beim Biomasseheizkraftwerk Großarl
- Spezialist: Dipl.-Ing. Richard Wipp, Geschäftsführer von VOIGT+WIPP Engineers GmbH
- Spezialist: Dipl.-Ing. Dr. Bernhard Kronberger, Abteilungsleiter von VOIGT+WIPP Engineers GmbH
- Spezialist: Univ. Prof. Dr. Tobias Pröll, Leiter des Instituts für Verfahrens- und Energietechnik an der Universität für Bodenkultur Wien

Es wäre von Vorteil gewesen noch den Planer der Anlage mit im Team zu haben. Doch der zuständige Ingenieur, der damals für die Firma Kohlbach GmbH den Thermoölkreislauf in Großarl plante, ist nicht mehr bei der Firma Kohlbach angestellt und die Suche nach dieser Person hätte zu viel Zeit in Anspruch genommen.

Als Termin für die Durchführung der HAZOP-Studie wurde der 04.10.2013 festgelegt. Bei der Auswahl der Räumlichkeit einigte man sich auf das Büro des Moderators in Linz, da Linz sowohl von Wien als auch von Großarl gut und relativ schnell zu erreichen ist. Laut der Norm von British Standard zur Durchführung von HAZOP-Studien (IEC 61882) sollte die HAZOP-Studie in kleinen Einheiten zu maximal zwei Stunden pro Einheit durchgeführt werden. Das war jedoch in diesem Fall nicht möglich, da die Teilnehmer weit voneinander getrennt arbeiten und damit zu viel Zeit und Geld für mehrere Treffen nötig gewesen wäre. Die HAZOP-Studie wurde um 09:00 Uhr morgens gestartet und um 17:00 Uhr beendet.

#### 4.2.1.2 Meeting Phase

Das R&I-Schema des Thermoölkreislaufs wurde auf Format A0 ausgedruckt und im Veranstaltungsraum aufgelegt. Der Schriftführer notierte die wichtigen Erkenntnisse in der HAZOP-Studientabelle, während der laufenden HAZOP-Studie, am Computer. Der Computer war an einen Beamer angeschlossen und dieser projizierte die Studientabelle an die Wand. So konnten alle Teilnehmer die gemeinsamen Arbeitsfortschritte der HAZOP-Studie verfolgen.

Die für diese HAZOP-Studie verwendete Studientabelle (siehe erster Teil im Anhang) wurde etwas modifiziert und entsprach dann nicht mehr vollständig der Vorlage aus der Norm (IEC

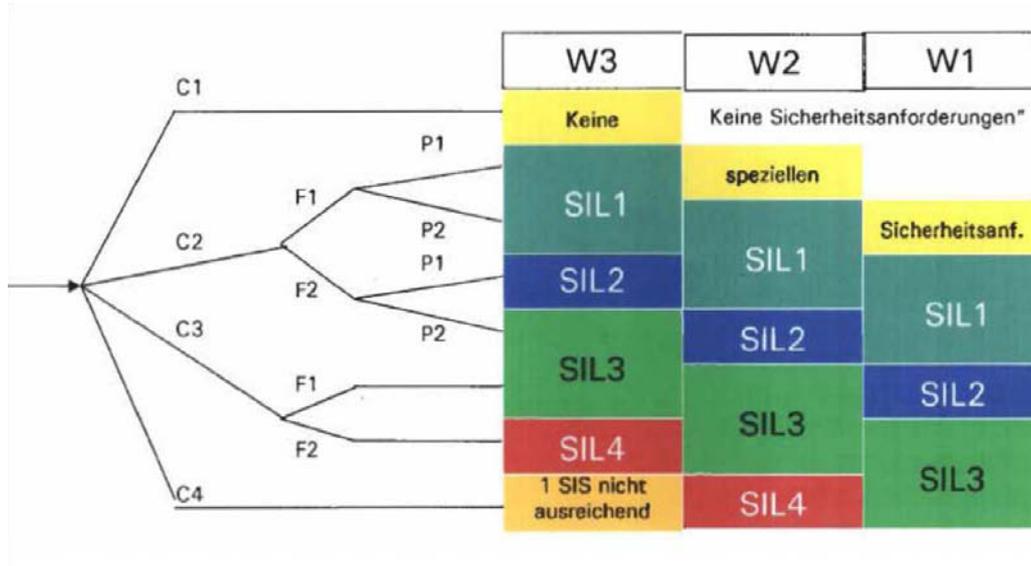
61882) die unter Punkt 4.1.1.4 dargestellt wurde. In dieser HAZOP-Studie wurden die Leitworte und die Prozessparameter gleich zu Abweichungen zusammengefasst. Die Nummerierung der Abweichungen befindet sich in der Spalte der Ursachen. Die Spalte „Kommentar“ und die Spalte „benötigte Aktionen“ wurden in einer Spalte zusammengefasst, in der „zu überprüfende“ Punkte, „Empfehlungen“ und „offene Punkte“ notiert wurden. Die Spalte „Verantwortlichkeit“ wurde durch die Spalte „SIL“ ersetzt.

Als Methode zur Bestimmung der SIL wurde der qualitative Risikograph herangezogen. Dabei wurden ausschließlich die Personenschäden unter die Lupe genommen. Umwelt- und Vermögensschäden waren nicht Gegenstand der Analyse. Zur Einstufung eines Prozesses bzw. einer Maschine in das richtige SIL werden vier Risikoparameter zur Beurteilung herangezogen.

1. **Schadensausmaß** (C - consequences): Die Auswirkungen des gefährlichen Ereignisses werden beurteilt.  
C<sub>1</sub>: leichte Verletzung von Personen  
C<sub>2</sub>: schwere, bleibende Verletzungen einer oder mehrerer Personen; Tod einer Person  
C<sub>3</sub>: Tod mehrerer Personen  
C<sub>4</sub>: Katastrophale Auswirkungen, viele Tote
2. **Aufenthaltswahrscheinlichkeit** (F - frequency of presence): Die Aufenthaltshäufigkeit im gefährlichen Bereich wird mit der Aufenthaltsdauer multipliziert.  
F<sub>1</sub>: seltener Aufenthalt in der gefährdeten Zone (unter 10 % der Arbeitszeit)  
F<sub>2</sub>: häufiger bis andauernder Aufenthalt in der gefährdeten Zone (über 10 % der Arbeitszeit)
3. **Gefahrenabwendung** (P - probability of avoiding the hazardous event): Die Möglichkeit, die Auswirkungen des gefährlichen Ereignisses zu vermeiden wird analysiert.  
P<sub>1</sub>: unter bestimmten Bedingungen möglich  
P<sub>2</sub>: fast unmöglich bis unmöglich
4. **Eintrittswahrscheinlichkeit** (W - demand rate): Die Wahrscheinlichkeit des unerwünschten Ereignisses wird beurteilt.  
W<sub>1</sub>: sehr geringe Eintrittswahrscheinlichkeit (Eintrittswahrscheinlichkeit kleiner als 0,05 pro Jahr - ein Ereignis seltener als alle 20 Jahre)  
W<sub>2</sub>: geringe Eintrittswahrscheinlichkeit (Eintrittswahrscheinlichkeit zwischen 0,25 und 0,05 pro Jahr - ein Ereignis alle 4 bis 20 Jahre)  
W<sub>3</sub>: relativ hohe Eintrittswahrscheinlichkeit (Eintrittswahrscheinlichkeit größer als 0,25 pro Jahr - ein Ereignis häufiger als alle 4 Jahre)

(ÖNORM EN 61511-3, 2005)

Diese vier Risikoparameter werden miteinander kombiniert und so erhält man die entsprechende SIL-Einstufung. Die folgende Abbildung zeigt den Risikographen, der bei der durchgeführten HAZOP-Studie verwendet wurde.



**Abbildung 4.1:** qualitativer Risikograph  
abgeänderte Darstellung (ÖNORM EN 61511-3, 2005)

Zu Beginn des Meetings stellte der Moderator in aller Kürze die Technik und die Regeln der HAZOP-Studie vor. Danach wurden die Systemgrenzen in einer gemeinsamen Diskussion festgelegt. Im zweiten Teil des Anhangs befindet sich das Schema des Thermoölkreislaufs, in dem die Systemgrenzen mit einem roten Balken markiert wurden.

Nach der Erklärung der Methode wurde der eigentliche HAZOP-Prozess, die Diskussion der Abweichungen, gestartet. Zuerst wurde der Durchfluss untersucht und mit verschiedenen, sinnvollen Leitwörtern kombiniert. Es folgten Abweichungen der Temperatur und des Drucks. Darauf folgend wurden Vermischungen von Thermoöl mit anderen Substanzen untersucht und am Ende wurden noch fehlende Prozessparameter behandelt.

Der Moderator sorgte dafür, dass alle sinnvollen Kombinationen von Leitwörtern und Prozessparametern diskutiert, und der Zeitplan eingehalten wurde. Des Weiteren wurde die komplette HAZOP-Diskussion mit Hilfe eines Diktiergeräts aufgezeichnet, damit es zu keinem Informationsverlust kommen konnte.

#### 4.2.1.3 Post-meeting Phase

Nach der HAZOP-Studie wurden die Aufnahmen des Diktiergeräts vom Schriftführer abgehört und sämtliche wichtige Informationen auf Papier gebracht. Darauf folgend wurde die HAZOP-Studientabelle thematisch sortiert und formatiert. Am Inhalt der HAZOP-Studientabelle wurde nichts geändert, da diese Tabelle das Produkt einer gemeinsamen Analyse ist. Ein Punkt, der während der Diskussion nicht endgültig geklärt wurde, „Vermischung: ORC-Medium in den Thermoölkreislauf“, hat der Schriftführer abschließend durch Hinzuziehen der Literatur vervollständigt. Im Zuge der Dokumentation der Ergebnisse, die vom Schriftführer durchgeführt wurde, konnten noch ein paar ergänzende „Empfehlungen“ und „zu prüfende Punkte“ herausgearbeitet werden, welche im Ergebniskapitel beschrieben werden. Die Ergebnisse dieser HAZOP-Studie

dienen zur Beurteilung der Sicherheit von Thermoölkreisläufen in Biomassekraftwerken und somit dieser Arbeit und können direkt von den Betreibern des Biomasseheizkraftwerks Großarl zur Verbesserung ihrer Sicherheit herangezogen werden.

### 4.2.2 Umsetzung der Experteninterviews

Im Zuge dieser Arbeit wurden drei mündliche Experteninterviews mit einem teilweise standardisierten Fragebogen durchgeführt. Die Fragen, die den Experten gestellt worden sind, finden sich gesammelt auf der nächsten Seite. Der Sinn und Zweck der Experteninterviews war es, genauere Informationen über Zwischenfälle in Biomassekraftwerken, welche einen Thermoölkreislauf betreiben, die in einem Brand endeten, zu erhalten.

Im Zuge der Recherche rückten drei Brandunfälle, die mit dem Thermoölkreislauf in Verbindung standen, in den Vordergrund.

- Brand im Biomasse-Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungs-Heizkraftwerk auf Altholzbasis in Hard (Vorarlberg) im Jahr 2002. Der Experte für das Brandereignis im Biomasseheizkraftwerk in Hard war, der zur Zeit des Vorfalles diensthabende Heizwart, Herr Manfred Mäser.
- Brand im Fernheizkraftwerk Toblach-Innichen (Südtirol) im Jahr 2012. Der Experte für den Brand im Biomasseheizkraftwerk Toblach-Innichen war der Geschäftsführer der enpro Energie Projekt GmbH. Ein großes Projekt der enpro Energie Projekt GmbH war bzw. ist das Fernheizkraftwerk Toblach-Innichen, weshalb Herr Ing. Enes Hamidovic als Experte dieses Brandes diente.
- Brand im Biomasse-Heizkraftwerk Altenmarkt (Salzburg) im Jahr 2013. Als Experte diente der Geschäftsführer der Holzwärme Altenmarkt GmbH, Herr Ing. Günther Seifter.

### **Vorlage Experteninterview**

*Um welche Art von Anlage handelte es sich?*

*Wer war der Betreiber der Anlage?*

*Welches Thermoöl wurde verwendet?*

*Wann ereignete sich der Brand?*

*In welchem Bereich des Thermoölkreislaufes entstand der Brand?*

*Was war die Ursache des Brandes?*

*Wie entwickelte sich der Brand?*

*Wie war der zeitliche Verlauf des Brandes? Wie lange dauerte der Brand?*

*Wie wurde reagiert als der Brand entdeckt wurde?*

*Wie groß war der Schaden?*

*Wurde die Anlage wieder aufgebaut?*

*Wenn ja, welche Verbesserungen wurden vorgenommen?*

*Wurde der finanzielle Schaden durch die Versicherung gedeckt?*



## 5 Ergebnisse

Zu Beginn des Ergebniskapitels werden die Ergebnisse der HAZOP-Studie, die am 04.10.2013 gemeinsam im Team erarbeitet wurden, ausführlich beschrieben. Die HAZOP-Studientabelle die während der HAZOP-Studie entstanden ist, befindet sich im ersten Teil des Anhangs. Die HAZOP-Studientabelle wurde formatiert und optisch aufpoliert, inhaltlich wurde jedoch nichts verändert. Im Zuge der Nachbearbeitung der HAZOP-Studie wurden noch ergänzende Schutzvorrichtungen und Empfehlungen gefunden, diese wurden in der Tabelle nicht ergänzt, sondern finden sich in den Erläuterungen der Abweichungen und deren Ursachen (Kapitel 5.1) wieder.

Nach den Ergebnissen der HAZOP-Studie und deren Darlegung folgen die Ergebnisse der drei Experteninterviews (Kapitel 5.2).

### 5.1 Ergebnisse der HAZOP-Studie

In diesem Abschnitt werden die einzelnen Abweichungen verschiedener Prozessparameter, deren Ursache und den sich daraus ergebenden Konsequenzen detailliert erläutert und beschrieben. Die Schutzvorrichtungen, die prinzipiell vor dem Versagen schützen sollen, werden angeführt. Des Weiteren wird ein offener Punkt, der im Zuge der HAZOP-Studie nicht abschließend geklärt wurde, mit Hilfe von Literatur aufgearbeitet („Vermischung: ORC-Medium in den Thermoölkreislauf“). Die zu prüfenden Punkte und die Empfehlungen der HAZOP-Studie werden am Ende dieses Kapitels erwähnt.

### 5.1.1 Abweichung des Durchflusses

Die beiden, redundant ausgeführten, Umwälzpumpen, die für einen konstanten Durchfluss von Thermoöl sorgen sollen, werden mit Hilfe eines elektrischen Drehstrommotors angetrieben. Im Normalbetrieb läuft immer nur eine Umwälzpumpe. Im Zuge der HAZOP-Studie wurden Leitworte mit dem Prozessparameter Durchfluss kombiniert und daraus ergaben sich folgende logische und sinnvolle Abweichungen:

- kein Durchfluss
- verringerter Durchfluss
- erhöhter Durchfluss
- falscher Durchfluss

Die Punkte 1 bis 10 der HAZOP-Studientabelle beschäftigen sich mit einem abweichenden Durchfluss.

#### 5.1.1.1 Kein Durchfluss, verringerter Durchfluss

Verringert sich der Thermoöldurchfluss bzw. findet gar kein Durchfluss mehr statt kann dies verheerende Folgen haben. Die beiden Abweichungen „kein Durchfluss“ und „verringertes Durchfluss“ werden hier in einem Unterpunkt erwähnt, da die Konsequenzen dieselben sind, lediglich treten diese bei „kein Durchfluss“ noch schneller ein. Die Punkte 1 bis 6 der HAZOP-Studientabelle beschreiben die Ursachen und die Konsequenzen bei verringertem bzw. keinem Durchfluss.

Im Normalfall, wenn gleichmäßig Biomasse der selben Qualität im Feuerraum verbrannt wird, die Wärmeabnahme konstant ist und der Durchfluss gleichmäßig ist, verlässt das Thermoöl den Thermoölkessel mit einer Temperatur von ca. 300 °C und kommt mit ca. 250 °C in den Kessel zurück. Verringert sich nun der Durchfluss wird das Thermoöl durch die verlängerte Aufenthaltszeit im Thermoölkessel unerwünscht stark erwärmt. In Heizkraftwerk Großarl wird das Thermoöl „Therminol 66“ der Solutia Inc., Tochterunternehmen der Eastman Chemical Group, eingesetzt. Laut Sicherheitsdatenblatt (msds - material safety data sheet) liegt der Siedepunkt dieses Thermoöls bei 359 °C und die Selbstentzündungstemperatur bei 373 °C (Solutia Inc., 2011). Diese Temperaturen sollten unter keinen Umständen erreicht oder gar überschritten werden. Beim Überschreiten des Siedepunktes verdampft das Thermoöl und das führt zu einem Druckanstieg im System. Bei einer Temperatur von 373 °C kann sich das Thermoöl bei Luftkontakt selbst entzünden und es kommt zum Brand. Temperaturerhöhungen die den Siedepunkt des Thermoöls nicht erreichen sind ebenfalls kritisch zu sehen. Hierbei kann es zu Schädigungen des Thermoöls kommen und Verkokungen im Kesselbereich können entstehen.

Je geringer der Durchfluss, desto stärker erwärmt sich das Thermoöl. Wird der Durchfluss nicht rechtzeitig wiederhergestellt, ergibt sich eine Abfolge von Konsequenzen. Zuerst kommt es

zu einer Überhitzung von Thermoöl im Bereich des Thermoölkessels. Dadurch wird das Thermoöl geschädigt und es entstehen Verkokungen. Erreicht das Thermoöl den Siedepunkt, verdampft es und es kommt zu einem Druckanstieg im System. In weiterer Folge können dadurch Rohrleitungen bersten. Aus den beschädigten Rohrleitungen tritt dann Thermoöl aus. Dies kann sowohl im Kesselbereich, oder außerhalb im Rohrleitungssystem, passieren. Das austretende Thermoöl kann bei Kontakt zu schwersten Verletzungen führen. Kommt es zum Bruch einer Leitung im Kessel (Kesselversagen) wird sich das Thermoöl aufgrund der sehr hohen Rauchgastemperaturen sofort entzünden und ein Großbrand, der nur sehr schwer wieder unter Kontrolle zu bringen ist, entsteht. Ohne entsprechende Gegenmaßnahmen werden diese Konsequenzen bei den ersten vier Abweichungen der HAZOP-Studientabelle (Punkt 1 bis 4 der HAZOP-Studientabelle) eintreten. Die Konsequenzen der Punkte 5 und 6 der HAZOP-Studientabelle weichen von den ersten vier Punkten ab und werden im Anschluss besprochen.

Um diese Konsequenzen zu vermeiden und einen verringerten Durchfluss schnellstmöglich zu erkennen und diesem entgegen zu wirken, werden beim Biomasseheizkraftwerk Großarl folgende Schutzvorrichtungen (für Punkt 1 bis 4 der HAZOP-Studientabelle) verwendet:

- Durchflussüberwachung mit dem Sensor FZA-- 1.910: Direkt nach dem Kesselaustritt wird in beiden Rohrgängen der Differenzdruck mit Hilfe zweier Blenden gemessen. Somit wird der Durchfluss erfasst und in der Schaltwarte angezeigt. Sinkt der Durchfluss unter einen bestimmten Mindestwert wird die Sicherheitskette ausgelöst, die Umwälzpumpen schalten ab, die Notkühlung springt an und es kommt zu einem Not-Stopp der Feuerung. Zusätzlich erscheint eine Alarmmeldung. Wenn die Sicherheitskette ausgelöst wird und dadurch der Notkühlkreislauf aktiviert wird, müssen die Umwälzpumpen abgeschaltet werden, da die Umwälzpumpen eine wesentlich größere Leistung haben als die Dieselpumpe des Notkühlkreislaufs.
- Hartverdrahtung: Der Sensor FZA-- 1.910 ist mit dem Leitsystem direkt über Draht verbunden.
- Sicherheitsventil: Das Sicherheitsventil beschränkt den zulässigen Betriebsdruck auf 10 bar. Ist der Druck im Thermoölkreislauf und im Ausdehnungsgefäß zu hoch, öffnet sich das Ventil.
- Notkühlung und automatische Ausschaltung der Feuerung: Unterschreitet der Durchfluss im Thermoölvorlauf einen bestimmten Mindestwert, schaltet die Umwälzpumpe ab, die Notkühlung wird aktiviert und die Feuerung automatisch abgeschaltet (Störabschaltung/Not-Stopp der Feuerung). Das Thermoöl wird nach dem Kesselaustritt direkt aus dem Vorlauf, mit Hilfe einer Dieselpumpe, zum Notkühler gefördert. In diesem Wärmeübertrager verdampft das Wasser und das gekühlte Thermoöl fließt zurück in den Kessel.

Es gibt unterschiedliche Gründe für einen unterbrochenen bzw. verminderten Durchfluss. Im Zuge der HAZOP-Studie wurden sämtliche Ursachen untersucht und diese werden nun einzeln dargelegt.

### Ursache: Geschlossene Handventile

Auf den ersten Blick ist es kaum möglich bei einem Handventil zu erkennen, ob dieses offen oder geschlossen ist. Dies lässt sich erst durch das Drehen am Ventil feststellen. Ein fälschlicherweise geschlossenes Handventil kann somit nicht sofort erkannt werden.

#### Gefahrenklasse: C<sub>2</sub>, F<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>

- C<sub>2</sub>: Die Konsequenzen reichen bis zum Bersten von Rohrleitungen (Austritt von 300 °C heißem Thermoöl) und zum Brand des Kessels und der gesamten Anlage. Da in einem Biomasseheizkraftwerk in der Regel, außer den Bediensteten, wenige Leute anwesend sind, können auch nicht viele verletzt oder gar getötet werden.
- F<sub>1</sub>: Die Bediensteten verbringen den Großteil ihrer Arbeitszeit in der Schaltwarte. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Bediensteten in der Anlagenhalle liegt bei unter 10 % der Arbeitszeit.
- P<sub>2</sub>: Wird der Durchfluss unterbrochen, können diese Konsequenzen nicht mehr abgewendet werden. (Annahme: die Sicherheitskette wird nicht aktiviert bzw. das geschlossene Ventil kann auch im Notkühlkreislauf nicht umgangen werden). Bis die Bediensteten wissen welches Handventil fälschlicherweise verschlossen ist und sie dieses dann wieder händisch geöffnet haben vergeht zu viel Zeit, um die Gefahren noch abwenden zu können.
- W<sub>2</sub>: Es wird von einer mittleren Eintrittswahrscheinlichkeit ausgegangen (ein Ereignis alle 4-20 Jahre).

Damit fällt der Punkt 1 der HAZOP-Studientabelle (sehr wenig bis kein Durchfluss von Thermoöl aufgrund von geschlossenen Handventilen) unter die Kategorie **SIL 1**.

### Ursache: Verschmutzung, Verstopfung im Kesselbereich

Bei einer Verschmutzung bzw. Verstopfung im Kesselbereich oder im Bereich des Thermoöl-Economizer ist das Notkühlsystem nicht direkt wirksam, da auch bei aktiviertem Notkühlbetrieb das Thermoöl durch die verengte Passage im Kesselbereich strömen muss. Im Vergleich zu Punkt 1 der HAZOP-Studientabelle wird es hier jedoch kaum zu einem plötzlichen Nulldurchfluss kommen, da sich beispielsweise Verkokungen nur langsam bilden und akkumulieren.

#### Gefahrenklasse: C<sub>2</sub>, F<sub>1</sub>, P<sub>1</sub>, W<sub>2</sub>

- C<sub>2</sub>: Die Konsequenzen reichen bis zum Bersten von Rohrleitungen (Austritt von 300 °C heißem Thermoöl) und zum Brand des Kessels und der gesamten Anlage. Da in einem Biomasseheizkraftwerk in der Regel, außer den Bediensteten, wenige Leute anwesend sind, können auch nicht viele verletzt oder gar getötet werden.

- F<sub>1</sub>: Die Bediensteten verbringen den Großteil ihrer Arbeitszeit in der Schaltwarte. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Bediensteten in der Anlagenhalle liegt bei unter 10 % der Arbeitszeit.
- P<sub>1</sub>: Bei sinkendem Durchfluss können die Gefahren noch rechtzeitig durch manuelles Eingreifen abgewendet werden. Ein plötzlicher Nulldurchfluss ist, wie bereits oben erwähnt, sehr unwahrscheinlich.
- W<sub>2</sub>: Es wird von einer mittleren Eintrittswahrscheinlichkeit ausgegangen (ein Ereignis alle 4-20 Jahre).

Punkt 2 der HAZOP-Studientabelle (verringertes Durchfluss von Thermoöl aufgrund von Verschmutzungen/Verstopfungen im Kesselbereich) benötigt **keine speziellen Sicherheitsanforderungen**.

#### **Ursache: Verschmutzung, Verstopfung außerhalb des Kesselbereichs**

Verschmutzungen bzw. Verstopfungen, die außerhalb des Kesselbereichs entstehen, sind sicherheitstechnisch weniger gefährlich, als solche die im Kesselbereich entstehen. Entstehen durchflussverringemde Verschmutzungen außerhalb des Kesselbereichs kann das Notkühlssystem diesen Engpass umgehen. Mit Hilfe des Notkühlbetriebs kann der Durchfluss wieder vollständig hergestellt werden, der verengte Bereich muss nicht mehr durchströmt werden. Vor den Umwälzpumpen besteht aufgrund des verminderten Durchflusses die Gefahr der Kavitation.

#### **Gefahrenklasse: C<sub>2</sub>, F<sub>1</sub>, P<sub>1</sub>, W<sub>2</sub>**

- C<sub>2</sub>: Die Konsequenzen reichen bis zum Bersten von Rohrleitungen (Austritt von 300 °C heißem Thermoöl) und zum Brand des Kessels und der gesamten Anlage. Da in einem Biomasseheizkraftwerk in der Regel, außer den Bediensteten, wenige Leute anwesend sind, können auch nicht viele verletzt oder gar getötet werden.
- F<sub>1</sub>: Die Bediensteten verbringen den Großteil ihrer Arbeitszeit in der Schaltwarte. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Bediensteten in der Anlagenhalle liegt bei unter 10 % der Arbeitszeit.
- P<sub>1</sub>: Wie in Punkt 2 der HAZOP-Studientabelle bereits erwähnt, führen Verschmutzungen und Ablagerungen langsam zu einer Verringerung des Durchflusses. Ein plötzlicher Nulldurchfluss ist sehr unwahrscheinlich. Zusätzlich ist das Notkühlsystem direkt wirksam.
- W<sub>2</sub>: Es wird von einer mittleren Eintrittswahrscheinlichkeit ausgegangen (ein Ereignis alle 4-20 Jahre).

Punkt 3 der HAZOP-Studientabelle (verringertes Durchfluss von Thermoöl aufgrund von Verschmutzungen/Verstopfungen außerhalb des Kesselbereichs) benötigt **keine speziellen Sicherheitsanforderungen**.

### Ursache: Pumpenausfall

Wenn die Umwälzpumpe ausfällt, kommt der Thermoölkreislauf zum Stillstand. Die redundante, zweite Umwälzpumpe schaltet sich in einem solchen Fall nicht ein, da normalerweise die Sicherheitskette anspringt und der Notkühlkreislauf aktiviert wird. Die zweite Pumpe ist lediglich als Reservepumpe vorgesehen. Bei Nulldurchfluss, wie in diesem Szenario, erwärmt sich das Thermoöl sehr schnell.

### Gefahrenklasse: C<sub>2</sub>, F<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>

- C<sub>2</sub>: Die Konsequenzen reichen bis zum Bersten von Rohrleitungen (Austritt von 300 °C heißem Thermoöl) und zum Brand des Kessels und der gesamten Anlage. Da in einem Biomasseheizkraftwerk in der Regel, außer den Bediensteten, wenige Leute anwesend sind, können auch nicht viele verletzt oder gar getötet werden.
- F<sub>1</sub>: Die Bediensteten verbringen den Großteil ihrer Arbeitszeit in der Schaltwarte. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Bediensteten in der Anlagenhalle liegt bei unter 10 % der Arbeitszeit.
- P<sub>2</sub>: Da in diesem Fall, wie in Punkt 1 der HAZOP-Studientabelle der Durchfluss komplett abreißt, erhitzt sich das Thermoöl so schnell, dass die Angestellten nicht mehr in der Lage sind dagegen vorzugehen (Annahme: Notkühlkreislauf springt nicht an).
- W<sub>2</sub>: Es wird von einer mittleren Eintrittswahrscheinlichkeit ausgegangen (ein Ereignis alle 4-20 Jahre).

Damit fällt der Punkt 4 der HAZOP-Studientabelle (kein Durchfluss von Thermoöl aufgrund eines Pumpenausfalls) unter die Kategorie **SIL 1**.

### Ursache: Ölverlust

Der Durchfluss von Thermoöl kann sich verringern, wenn das Thermoöl aufgrund einer Leckage im Thermoölkreis verloren geht. Durch austretendes Thermoöl besteht eine unmittelbare Gefährdung von Personen, die sich in der Nähe aufhalten. Zusätzlich besteht höchste Brandgefahr. Kleine Leckagen lassen sich mit Durchflussmessensoren, wie dem FZA- 1.910, nicht erkennen, da diese kleinen Ölverluste vom Ausdehnungsgefäß bzw. vom Sammelgefäß ausgeglichen werden. Wenn das austretende Thermoöl nicht optisch erkannt wird, wird spätestens der Mindestniveausensor (Flüssigkeitsstandbegrenzer) im Ausdehnungsgefäß (LZA- 6.2.2.150) beim Unterschreiten eines gewissen Mindestthermoöllevels ansprechen, die Sicherheitskette aktivieren und eine Alarmmeldung aussenden. Der Flüssigkeitsstandbegrenzer LZA- 6.2.2.150 ist hartverdrahtet. Ein weiterer Indikator zur Erkennung eines Ölverlustes könnte der Sensor LSA+ des Ausdehnungsgefäßes sein. Regelmäßige und aufmerksame Rundgänge und Wartungen lassen schleichende Thermoölverluste erkennen. Des Weiteren sollten bei der Errichtung einer Thermoölanlage, wie auch in der EN 746 Teil 2 gefordert, Flansche weitestgehend vermieden werden (ÖNORM EN 746-2,

2011). Die Ventile müssen bestmöglich abgedichtet werden und die Isolierung sollte den höchsten Ansprüchen genügen.

**Gefahrenklasse: C<sub>2</sub>, F<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, W<sub>3</sub>**

- C<sub>2</sub>: Austretendes Thermoöl kann die Personen die sich im Biomasseheizkraftwerk befinden direkt schwer verletzen, oder einen Brand auslösen, der nur schwer wieder unter Kontrolle zu bringen ist und die menschliche Gesundheit gefährdet. Im Normalfall sind außer den Bediensteten keine Personen in einem Biomasseheizkraftwerk anwesend.
- F<sub>1</sub>: Die Bediensteten verbringen den Großteil ihrer Arbeitszeit in der Schaltwarte. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Bediensteten in der Anlagenhalle liegt bei unter 10% der Arbeitszeit.
- P<sub>2</sub>: Der Ölverlust findet bereits statt. Die Gefahren können nicht mehr abgewendet, sondern nur noch kontrolliert werden.
- W<sub>3</sub>: Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ölverlustes ist hoch (ein Ereignis häufiger als alle 4 Jahre).

Damit fällt der Punkt 5 der HAZOP-Studientabelle (verringertes Durchfluss von Thermoöl aufgrund eines Ölverlustes) unter die Kategorie **SIL 1**.

**Ursache: Unterschiedlich starke Verschmutzung der Rohrgänge**

Durch den Thermoölkessel gehen zwei Thermoölleitungen. Der Durchfluss in einem Rohrgang kann sich verringern wenn sich in einem Rohr mehr Verschmutzungen anlagern. Dadurch können unterschiedliche Temperaturen in den Rohrgängen entstehen. Das könnte wiederum Verkokungen verursachen, die die Rohre bzw. das Thermoöl überhitzen. Zusätzlich kann es zu Ausdampfungen kommen, welche einen Druckanstieg zur Folge haben. Dadurch können die Kesselrohre geschädigt werden bzw. brechen und Thermoöl tritt aus, wodurch Personen gefährdet werden und akute Brandgefahr herrscht. Im Kesselbereich kann, in weiterer Folge, die maximal zulässige Filmtemperatur des Thermoöls, im Fall vom Biomasseheizkraftwerk Großarl 375 °C (Therminol 66), überschritten werden (Solutia Europe S.A./N.V., 1998). Wird das Thermoöl stark erhitzt kann es Schäden davon tragen, bzw. rasch altern. Als Schutzvorrichtung dienen die beiden Durchflusssensoren FZA-- 1.910, die in beiden Rohrgängen montiert sind.

**Gefahrenklasse: C<sub>2</sub>, F<sub>1</sub>, P<sub>1</sub>, W<sub>3</sub>**

- C<sub>2</sub>: Die Konsequenzen reichen bis zum Bersten von Rohrleitungen (Austritt von 300 °C heißem Thermoöl) und zum Brand des Kessels und der gesamten Anlage. Da in einem Biomasseheizkraftwerk in der Regel, außer den Bediensteten, wenige Leute anwesend sind, können auch nicht viele verletzt oder gar getötet werden.

- $F_1$ : Die Bediensteten verbringen den Großteil ihrer Arbeitszeit in der Schaltwarte. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Bediensteten in der Anlagenhalle liegt bei unter 10 % der Arbeitszeit.
- $P_1$ : Wie in Punkt 2 und 3 der HAZOP-Studientabelle ist es auch bei dieser Abweichung sehr unwahrscheinlich, dass es sofort zu einem Nulldurchfluss im Thermoölkreislauf kommen. Aufgrund der langsam fortschreitenden Verschmutzung bzw. Ablagerung wird sich der Durchfluss stetig verringern.
- $W_3$ : Die Eintrittswahrscheinlichkeit von unterschiedlich stark verschmutzten Rohren, und somit unterschiedlichem Durchfluss in den Rohrgängen, ist hoch (ein Ereignis häufiger als alle 4 Jahre).

Damit fällt der Punkt 6 der HAZOP-Studientabelle (verringertes Durchfluss von Thermoöl aufgrund unterschiedlich stark verschmutzter Rohrgänge) unter die Kategorie **SIL 1**.

### 5.1.1.2 Erhöhter Durchfluss

In der Regel ist eine Erhöhung des Thermoöldurchflusses nicht mit Gefahren für Mensch und Maschine/Anlage verbunden. Durch einen erhöhten Durchfluss sinkt die Vorlauftemperatur des Thermoöls und deshalb werden die Konsequenzen, wie sie bei einem verringerten Durchfluss angesprochen wurden, nicht eintreten. Die Ausnahme bildet Punkt 8 der HAZOP-Studientabelle, der nachfolgend besprochen wird. Erhöht sich der Durchfluss, wird die Vorlauftemperatur (in der Regel ca. 300 °C) nicht mehr erreicht, die Rücklauftemperatur bleibt gleich, das bedeutet, dass sich die Temperaturspreizung verringert. Eine kurzzeitig erhöhte Brennstoff- und Luftzufuhr wird die Vorlauftemperatur wieder auf 300 °C regeln, die Rücklauftemperatur steigt dabei an. Danach wird sich dieselbe Leistung einstellen wie zuvor, da die Leistung das Produkt aus Temperaturspreizung und Volumenstrom ist ( $P = \dot{m} * c_p * \Delta T$ ). Durch den erhöhten Volumenstrom ergibt sich jedoch auch ein erhöhter Stromverbrauch aufgrund der gesteigerten Pumpenleistung. Deshalb ist es sinnvoll den Volumenstrom kleiner und die Temperaturspreizung groß zu halten.

#### Ursache: Beide Pumpen laufen

Sollte es dazu kommen, dass beide Umwälzpumpen laufen, erhöht sich der Durchfluss. Dieser höhere Durchfluss erhöht auch den Vordruck nach den Pumpen. Wie bereits oben angesprochen, verringert sich die Temperaturspreizung und es können Strömungsprobleme in den Rohrleitungen entstehen (wie etwa Turbulenzen nach einem Rohrknick, oder auch Kavitation auf der Saugseite der beiden Umwälzpumpen, da das Thermoöl nicht mehr gleichmäßig fließt). Der Stromverbrauch wird aufgrund der erhöhten Pumpenleistung bzw. durch das dazu Schalten der zweiten Pumpe ansteigen. Prinzipiell sollte es nicht zu dieser Situation kommen, da die gegenseitige Verriegelung der beiden Umwälzpumpen als Schutzvorrichtung dient. Selbst wenn sich die zweite Pumpe dazu schalten sollte, gefährdet dies nicht die Anlagensicherheit und deshalb ist der Punkt 7 der HAZOP-Studientabelle **nicht sicherheitstechnisch relevant**.

### Ursache: Leckage auf der Druckseite der Pumpe

Sollte Thermoöl durch ein Leck auf der Druckseite der Pumpe austreten, erhöht sich der Durchfluss im Bereich der Pumpen. Der Druck sinkt im Pumpenvorlauf ab und deshalb erhöht sich in diesem Bereich der Durchfluss. Die anderen Bereiche des Kreislaufs weisen dieselben Durchflussraten auf. In diesem Fall ist nicht der erhöhte Durchfluss sicherheitstechnisch relevant, sondern die Leckage, aus der heißes Thermoöl austritt. Durch das austretende Thermoöl besteht (analog zu Punkt 5 der HAZOP-Studientabelle) eine unmittelbare Gefahr für Personen und eine hohe Brandgefahr. Die Schutzvorrichtungen sind dieselben wie in Punkt 5 der HAZOP-Studientabelle und auch die Gefahrenklasse bleibt unverändert.

### Gefahrenklasse: C<sub>2</sub>, F<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, W<sub>3</sub>

- C<sub>2</sub>: Austretendes Thermoöl kann die Personen die sich im Biomasseheizkraftwerk befinden direkt schwer verletzen, oder einen Brand auslösen, der nur schwer wieder unter Kontrolle zu bringen ist und die menschliche Gesundheit gefährdet. Im Normalfall sind außer den Bediensteten keine Personen in einem Biomasseheizkraftwerk anwesend.
- F<sub>1</sub>: Die Bediensteten verbringen den Großteil ihrer Arbeitszeit in der Schaltwarte. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Bediensteten in der Anlagenhalle liegt bei unter 10 % der Arbeitszeit.
- P<sub>2</sub>: Hat sich ein Leck im Bereich der Pumpen oder der Rohrleitungen gebildet, kann das Thermoöl nicht mehr zurückgehalten werden. Es kommt zum Austritt des heißen Thermoöls.
- W<sub>3</sub>: Die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Undichtheit oder Leckage im Bereich der Druckseite der Pumpen ist hoch (ein Ereignis häufiger als alle 4 Jahre).

Damit fällt der Punkt 8 der HAZOP-Studientabelle (zu viel Durchfluss von Thermoöl aufgrund einer Leckage auf der Druckseite der Pumpe) unter die Kategorie **SIL 1**.

#### 5.1.1.3 Falscher Durchfluss

Eine weitere Abweichung des Durchflusses ist der falsche Durchfluss, bei dem angenommen wird, dass das Thermoöl zurückströmt. Das Thermoöl strömt dann nicht mehr kontinuierlich und gleichmäßig in die „richtige“ Richtung. In den Punkten 9 und 10 der HAZOP-Studientabelle wurde die Annahme getroffen, dass die Rückschlagklappen, die sich nach den beiden Umwälzpumpen und nach dem Notkühler befinden, ihre Funktion nicht mehr erfüllen. Generell wird den Rückschlagklappen keine große Zuverlässigkeit nachgesagt („zum Teil werden sie behandelt, als wären sie gar nicht vorhanden“ (Zschetzsche, 2013)).

### **Ursache: Durchfluss des Thermoöls verkehrt über den Notkühler**

Bei dieser Abweichung geht man davon aus, dass die Rückschlagklappe im Notkühlkreislauf versagt und das Thermoöl vom Rücklauf zurück zum Notkühler fließt. Da ein Teil des Thermoöls dadurch Richtung Notkühler fließt, wird der Durchfluss durch den Thermoölkessel geringer und beim Unterschreiten eines Mindestdurchflusses springt der Durchflusssensor FZA-1.910 an. Dadurch wird die Sicherheitskette ausgelöst und das Thermoöl fließt über den Notkühlkreislauf und die Feuerung geht in den Not-Stopp. Wenn die Rückschlagklappe versagt und das Thermoöl mit einer Rücklauftemperatur von 250 °C in den Notkühler gelangt, wird das im Notkühlbehälter vorhandene Wasser sofort verdampfen. Der Wasserdampf ist dann sichtbar und es kann darauf reagiert werden. Als Schutzvorrichtung dient einmal mehr der Durchflusswächter FZA-1.910. Unterschreitet der Thermoölkesseldurchfluss jedoch nicht den Mindestdurchfluss des FZA-1.910, wird die Sicherheitskette nicht ausgelöst. Aufgrund dessen wird stets ein Teil des Thermoöls durch den Notkühler heruntergekühlt und es kommt langfristig zu einer geringeren Leistung. Durch das Ausdampfen des Wassers im Notkühlbecken sollte das Versagen der Rückschlagklappe jedoch nicht lange unentdeckt bleiben.

Der Punkt 9 der HAZOP-Studientabelle (falscher Durchfluss aufgrund des Versagens der Rückschlagklappe im Notkühlkreislauf) ist **nicht sicherheitstechnisch relevant**.

### **Ursache: Versagen der Rückschlagklappe im Pumpenvorlauf bei Notkühlbetrieb**

Befindet sich die Anlage im Notkühlbetrieb, das heißt, dass aus einem bestimmten Grund ein Begrenzer eine Störschaltung verursacht hat und somit die Sicherheitskette auslöst, läuft das Thermoöl vom Kesselvorlauf direkt Richtung Notkühler. Verlässt das gekühlte Thermoöl nun den Notkühlkreislauf sollte es schnellstmöglich durch den Thermoölkessel, um diesen zu kühlen, bzw. um das eventuell bereits überhitzte Thermoöl wieder aus dem Kesselbereich „zu schieben“. Versagen nun die Rückschlagklappen im Vorlauf der beiden Umwälzpumpen, kommt das „gekühlte“ Thermoöl nicht komplett und sofort in den Kessel, sondern fließt teilweise auch in die Richtung der beiden Umwälzpumpen. Dies verzögert die Kühlung im Bereich des Thermoölkessels.

Durch die reduzierte Kühlwirkung im Notkühlbetrieb kann es zu Überhitzungen des Thermoöls im Kesselbereich kommen. Dadurch können Verkokungen entstehen, welche auch einen reduzierten Durchfluss verursachen. Die verspätete Kühlwirkung bewirkt, dass die Thermoöltemperatur kurzfristig ansteigt. Diese eben genannten Auswirkungen sind jedoch nicht dramatisch und deshalb ist der Punkt 10 der HAZOP-Studientabelle (falscher Durchfluss von Thermoöl im Notkühlbetrieb aufgrund des Versagens der Rückschlagklappen im Pumpenvorlauf) **nicht sicherheitstechnisch relevant**.

### 5.1.2 Abweichung der Temperatur

Ziel eines Biomasseheizkraftwerks ist es, das Thermoöl möglichst konstant zu erhitzen und somit gleichmäßig auf einem hohen Temperaturniveau zu halten. Das Biomasseheizkraftwerk Großarl und auch andere vergleichbare Anlagen regeln die Vorlauftemperatur auf ca. 300 °C, die Rücklauftemperatur liegt dann, je nach Wärmeabnahme, bei ca. 250 bis 260 °C. Sinkt das Temperaturniveau, steigt die Viskosität und die spezifische Wärmekapazität sinkt (Wagner, 2005). In diesem Fall steigt der Stromverbrauch der Umwälzpumpen und die gespeicherte Wärmeenergie pro Kilogramm Thermoöl ist geringer. Wird die Temperatur des Thermoöls jedoch zu hoch, kommt es zu einer schnelleren Alterung des Thermoöls, zu Verkokungen an den Rohrleitungswänden und es kann zu noch gravierenderen Schädigungen und Gefahren im Anlagenbereich kommen. Die maximal zulässige Temperatur laut Sicherheitsdatenblatt (msds von Therminol 66) liegt bei 345 °C (Solutia Europe S.A./N.V., 1998). Die Betreiber des Biomassekraftwerks Großarl, sowie der anderen Biomassekraftwerke die mit Thermoöl arbeiten, versuchen die Vorlauftemperatur möglichst konstant auf ca. 300 °C zu regeln. Je nach verwendetem Thermoöl kann die Vorlauftemperatur etwas höher oder etwas niedriger sein.

In diesem Ergebnisteil werden folgende Abweichungen der Thermoöltemperatur untersucht:

- zu hohe Temperatur des Thermoöls
- zu niedrige Temperatur des Thermoöls

Die Punkte 11 bis 18 der HAZOP-Studientabelle beschäftigen sich mit abweichenden Thermoöltemperaturen.

#### 5.1.2.1 Zu hohe Temperaturen des Thermoöls

Steigende Thermoöltemperaturen stellen eine große Gefahr für die Sicherheit der Anlage und damit der dort beschäftigten Personen dar. Vor allem durch die Verwendung des Thermoöls in einem sehr hohen Temperaturbereich (Vorlauftemperatur bei rund 300 °C), der relativ nahe an der maximal zulässigen Temperatur von 345 °C liegt, ist besondere Vorsicht geboten. Bereits bei geringen Erhöhungen der Temperatur können Verkokungen und Schädigungen des Thermoöls eintreten. Im folgenden Abschnitt werden Ursachen für steigende Temperaturen aufgelistet und deren Konsequenzen beleuchtet.

#### Ursache: Zu geringer Durchfluss

Verringert sich der Durchfluss des Thermoöls, kommt es durch den längeren Aufenthalt des Thermoöls im Kessel zu unerwünscht hohen Temperaturen. Hier wird jedoch auf das Kapitel 5.1.1.1 verwiesen, indem bereits die Verringerung des Durchflusses und dessen Konsequenzen besprochen wurden (Punkt 1 bis 6 der HAZOP-Studientabelle).

### **Ursache: Zu große Feuerleistung oder zu geringe Energieabnahme**

Das HAZOP-Team kam zur Auffassung, dass sowohl eine zu große Feuerleistung im Feuer- raum, als auch eine zu geringe Energieabnahme die Temperatur des Thermoöls erhöhen kann. Somit rufen beide Ereignisse dasselbe Ergebnis hervor und deshalb werden diese beiden Punkte hier gemeinsam behandelt.

Steigt die Temperatur des Thermoöls im Kesselbereich, kann dies dazu führen, dass sich Ver- kokungen an den Rohrwänden bilden. Wird der Siedepunkt von 359 °C des „Therminol 66“ über- schritten, führt dies zu Ausdampfungen. Ausdampfungen können in der Folge die Kesselrohre durch den Druckanstieg beschädigen oder gar zerstören. Wenn es dazu kommt, dass Thermo- öl austritt, kann das Thermoöl bei menschlichem Kontakt zu schweren Verbrennungen führen, des Weiteren besteht eine große Brandgefahr. Die maximale Filmtemperatur wird im Sicher- heitsdatenblatt mit 375 °C angegeben (Solutia Europe S.A./N.V., 1998). Wird diese maximale Filmtemperatur überschritten, sind starke Schädigungen des Thermoöls und des Rohrsystems zu erwarten. Selbst wenn die Temperaturerhöhung die Grenzwerte der Sicherheitsdatenblätter nicht überschreitet, kann das Thermoöl bereits beschädigt werden. Wird die Vorlauftemperatur dauerhaft erhöht und die Anlage mit einer höheren Vorlauftemperatur betrieben (die Viskosität sinkt und die spezifische Wärmekapazität des Thermoöls steigt), führt dies zu einer schnelleren Alterung des Thermoöls (siehe Kapitel 5.1.5.1 bzw. Punkt 29 der HAZOP-Studientabelle).

Erhöht sich die Temperatur des Thermoöls zu stark springt der Sicherheitstemperaturbegren- zer TZA+ 1.900 an und löst die Sicherheitskette und einen Not-Stopp der Feuerung aus. Die Notkühlung, die beim Auslösen der Sicherheitskette aktiviert wird, dient als Schutzeinrichtung sowie die zumindest einmal jährlich durchzuführende Prüfung des Thermoöls.

#### **Gefahrenklasse: C<sub>2</sub>, F<sub>1</sub>, P<sub>1</sub>, W<sub>3</sub>**

- C<sub>2</sub>: Die Konsequenzen reichen bis zum Bersten von Rohrleitungen (Austritt von 300 °C heißem Thermoöl) und zum Brand des Kessels und der gesamten Anlage. Da in einem Biomasseheizkraftwerk in der Regel, außer den Bediensteten, wenige Leute anwesend sind, können auch nicht viele verletzt oder gar getötet werden.
- F<sub>1</sub>: Die Bediensteten verbringen den Großteil ihrer Arbeitszeit in der Schaltwarte. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Bediensteten in der Anlagenhalle liegt bei unter 10 % der Arbeitszeit.
- P<sub>1</sub>: Steigt die Feuerleistung bzw. sinkt die Energieabnahme, kann die Temperatur des Thermoöls ansteigen. Die dadurch entstehenden Gefahren können aber in der Regel noch abgewendet werden. Es kommt nicht zu einer abrupten Erhöhung der Thermoöltemperatur und die Zirkulation ist nach wie vor gewährleistet.
- W<sub>3</sub>: Die Eintrittswahrscheinlichkeit einer steigenden Feuerleistung (verschiedene Feuch- tgrade des Brennstoffs) oder einer sinkenden Energieabnahme (Nutzungsverhalten der

Endverbraucher) ist hoch (ein Ereignis häufiger als alle 4 Jahre). In beiden Punkten kann es zu starken Schwankungen kommen.

Damit fällt der Punkt 12 der HAZOP-Studientabelle (zu hohe Thermoöltemperaturen aufgrund zu großer Feuerleistung oder zu geringer Energieabnahme) unter die Kategorie **SIL 1**.

### **Ursache: Zu hohe Temperaturen im Feuerraum**

Wenn sich die Temperaturen im Feuerraum erhöhen, werden die beiden mit Thermoöl gefüllten Rohrbündel, die durch den Kessel gehen, stärker erhitzt. Dadurch steigt die Wandtemperatur der Rohrbündel und im Übergangsbereich, zwischen Thermoöl und Rohr, kann die maximal zulässige Filmtemperatur überschritten werden. Die beim Sicherheitstempurbegrenzer (TZA+ 1.900) gemessene Thermoöltemperatur muss sich gar nicht vergrößern, lediglich die Filmtemperatur des Thermoöls im Kesselbereich steigt bedrohlich an. Der Sicherheitstempurbegrenzer TZA+ 1.250 dient nur als Schutz vor zu hohen Rauchgaseintrittstemperaturen in den Thermoöl-Economizer. Beim Biomasseheizkraftwerk Großarl gibt es keinen Sicherheitstempurbegrenzer, der den Thermoölkessel vor zu hohen Rauchgaseintrittstemperaturen schützt. Dabei kann es zu lokalen Überhitzungen kommen, die zu denselben Konsequenzen führen, wie im Punkt 12 zuvor angesprochen. Kommt es im Kessel zu Schädigungen an den beiden Rohrbündeln und tritt dabei Thermoöl aus, entzündet sich dieses sofort. Zur Überwachung der Feuerraumtemperaturen werden beim Biomasseheizkraftwerk Großarl vier Temperaturfühler eingesetzt. Eine Schutzvorrichtung, die den Thermoölkessel vor zu hohen Rauchgaseintrittstemperaturen schützt, und mit der Sicherheitskette verbunden ist (dies würde dann bei der Überschreitung einer maximalen Rauchgaseintrittstemperatur automatisch zu einem Not-Stopp der Feuerung führen und den Notkühlkreislauf auslösen), gibt es momentan noch nicht. Es wird jedoch dringend empfohlen den Thermoölkreislauf im Biomasseheizkraftwerk Großarl mit einem Rauchgaseintrittstempurbegrenzer nachzurüsten (siehe Kapitel 5.1.6.2: Kontrolle der Rauchgastemperatur im Thermoölkessel).

### **Gefahrenklasse: C<sub>2</sub>, F<sub>1</sub>, P<sub>1</sub>, W<sub>3</sub>**

- C<sub>2</sub>: Die Konsequenzen reichen bis zum Bersten von Rohrleitungen (Austritt von 300 °C heißem Thermoöl) und zum Brand des Kessels und der gesamten Anlage. Da in einem Biomasseheizkraftwerk in der Regel, außer den Bediensteten, wenige Leute anwesend sind, können auch nicht viele verletzt oder gar getötet werden.
- F<sub>1</sub>: Die Bediensteten verbringen den Großteil ihrer Arbeitszeit in der Schaltwarte. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Bediensteten in der Anlagenhalle liegt bei unter 10 % der Arbeitszeit.
- P<sub>1</sub>: Einer steigenden Feuerraumtemperatur kann entgegengewirkt werden. Messen die vier Temperaturfühler im Feuerraum zu hohe Temperaturen, fährt die Anlage/der Feuerraum in „Gluterhaltung“. Die Programmstufe „Gluterhaltung“ bedeutet, dass die Primärluft ausgeht

und die Brennstoffzufuhr gestoppt wird. Die „Gluterhaltung“ ist eine Maßnahme, um die Leistung und die Temperaturen im Feuerraum schnell zu verringern.

- W<sub>3</sub>: Die Eintrittswahrscheinlichkeit von erhöhten Feuerraumtemperaturen ist hoch (ein Ereignis häufiger als alle 4 Jahre). Aufgrund unterschiedlicher Biomasse und deren unterschiedliche Feuchtigkeit variieren die Feuerraumtemperaturen zum Teil erheblich.

Damit fällt der Punkt 13 der HAZOP-Studientabelle (zu hohe Thermoöltemperaturen aufgrund von zu hohen Temperaturen im Feuerraum) unter die Kategorie **SIL 1**.

### Ursache: Keine Nachspeisung von Kühlwasser im Notkühlbetrieb

Fährt der Thermoölkreislauf über den Notkühlbetrieb ist die Sicherheitskette bereits aktiviert worden und es verdampft im Wärmeübertrager „Notkühler“ das Wasser aus dem Notkühlbecken. Damit wird die Temperatur des Thermoöls gesenkt und das gesamte System gekühlt. Wenn kein Kühlwasser vorhanden ist, fällt logischerweise die Kühlung aus und das Thermoöl wird im Kessel weiter erhitzt und die Temperatur steigt an. Das Kühlbecken wird mit dem Flüssigkeitsstandbegrenzer LZA- 6.1.7.150 überwacht. Wenn kein Kühlwasser im



**Abbildung 5.1:** Notkühlbecken in Grossarl

Notkühlbecken vorhanden ist, lässt sich der Thermoölkreislauf gar nicht starten. Sobald das Kühlwasser ein bestimmtes Mindestniveau (wird durch LZA- 6.1.7.150 überwacht) unterschreitet, geht der Thermoölkreislauf in den gesicherten Abfahrmodus. Dabei wird der Notkühlkreislauf nicht aktiviert, die Umwälzpumpe läuft weiter und die Feuerung geht in einen Not-Stopp. Wenn die Wasserzufuhr abgedreht ist, geht der Thermoölkreislauf wiederum in den gesicherten Abfahrbetrieb. Bisher wurde immer mit der Sicherheitskette die Notkühlung ausgelöst, das darf in dieser Situation jedoch nicht passieren. Ist kein Wasser im Notkühlbecken wird das Thermoöl nicht gekühlt und zusätzlich ist der Thermoölkreislauf noch kürzer, dadurch kühlt das Thermoöl weniger ab als im Normalbetrieb. In einem solchen Fall, wenn der Flüssigkeitsstandbegrenzer (LZA- 6.1.7.150) des Notkühlbeckens ausgelöst wird, geht die Anlage in ein gesichertes Abfahren über. Der LZA- 6.1.7.150 ist mit der Sicherheitskette verbunden, aktiviert allerdings im Gegensatz zu den anderen Begrenzern nicht den Notkühlkreislauf. Das Notkühlbecken fasst rund 2,5 Kubikmeter Wasser, diese Vorlage reicht für ca. 20 Minuten Notkühlbetrieb aus.

Wird kein Wasser im Notkühlbetrieb nachgespeist, wird das Thermoöl nicht gekühlt und es kommt zu den gleichen Konsequenzen wie bereits im Punkt 12 der HAZOP-Studientabelle dargestellt (Verkokungen, Ausdampfungen von Thermoöl, Überschreiten der maximalen Filmtemperatur, Schädigung der Kesselrohre, Verbrennungen an Bediensteten und Gefahr eines Brandes). Bei nicht vorhandener Wasserversorgung fährt der Kessel automatisch über den gesicherten Abfahrbetrieb herunter. Dabei reicht die vorhandene Vorlage an Wasser im Notkühlbecken für ca. 20 Minuten Notkühlbetrieb.

**Gefahrenklasse: C<sub>2</sub>, F<sub>1</sub>, P<sub>1</sub>, W<sub>2</sub>**

- C<sub>2</sub>: Die Konsequenzen reichen bis zum Bersten von Rohrleitungen (Austritt von 300 °C heißem Thermoöl) und zum Brand des Kessels und der gesamten Anlage. Da in einem Biomasseheizkraftwerk in der Regel, außer den Bediensteten, wenige Leute anwesend sind, können auch nicht viele verletzt oder gar getötet werden.
- F<sub>1</sub>: Die Bediensteten verbringen den Großteil ihrer Arbeitszeit in der Schaltwarte. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Bediensteten in der Anlagenhalle liegt bei unter 10 % der Arbeitszeit.
- P<sub>1</sub>: Die Gefahren dieser Abweichung sind abwendbar, da selbst bei Ausfall der Nachspeisung von Kühlwasser bei Notkühlbetrieb, die vorhandene Vorlage noch für den Abfahrbetrieb reicht. In dieser Zeit ist ein gesichertes Abfahren möglich.
- W<sub>2</sub>: Es wird von einer mittleren Eintrittswahrscheinlichkeit ausgegangen (ein Ereignis alle 4-20 Jahre).

Punkt 14 der HAZOP-Studientabelle (zu hohe Thermoöltemperaturen aufgrund keiner Nachspeisung von Kühlwasser im Notkühlbetrieb) benötigt **keine speziellen Sicherheitsanforderungen**.

**Ursache: Fehlendes Kühlwasser für den Notkühlbetrieb**

Sollte der Fall eintreten, dass sich im laufenden Betrieb kein Kühlwasser im Notkühlbecken befindet, die Sicherheitskette ausgelöst wird und der Thermoölkreislauf statt in den gesicherten Abfahrmodus zu gehen, die Notkühlung startet, hat das katastrophale Auswirkungen. Dann kommt es zu keiner Kühlung des Thermoöls und zusätzlich verkürzt sich der Thermoölkreislauf. Die Konsequenzen sind dieselben, wie zuvor in Punkt 12 der HAZOP-Studientabelle abgehandelt. Als Schutzvorrichtung dient wiederum der LZA- 6.1.7.150, der das Wasserniveau des Notkühlbeckens überwacht. Befindet sich, aus welchem Grund auch immer, kein Wasser im Notkühlbecken wird die Anlage gesichert abgefahren werden. Gesichert abfahren bedeutet, dass die Umwälzpumpen weiterlaufen und die Feuerung in einen Not-Stopp geht, der Notkühlkreislauf wird nicht aktiviert. Die Aktivierung des Notkühlkreislaufs in einer solchen Situation hätte fatale Konsequenzen. Prinzipiell lässt sich die Anlage bei einem leeren Kühlwasserbecken gar nicht starten.

**Gefahrenklasse: C<sub>2</sub>, F<sub>1</sub>, P<sub>1</sub>, W<sub>2</sub>**

- C<sub>2</sub>: Die Konsequenzen reichen bis zum Bersten von Rohrleitungen (Austritt von 300 °C heißem Thermoöl) und zum Brand des Kessels und der gesamten Anlage. Da in einem Biomasseheizkraftwerk in der Regel, außer den Bediensteten, wenige Leute anwesend sind, können auch nicht viele verletzt oder gar getötet werden.
- F<sub>1</sub>: Die Bediensteten verbringen den Großteil ihrer Arbeitszeit in der Schaltwarte. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Bediensteten in der Anlagenhalle liegt bei unter 10 % der Arbeitszeit.
- P<sub>1</sub>: Die Konsequenzen können abgewendet werden, in dem der Thermoölkreislauf gesichert heruntergefahren wird.
- W<sub>2</sub>: Es wird von einer mittleren Eintrittswahrscheinlichkeit ausgegangen (ein Ereignis alle 4-20 Jahre). Die Wahrscheinlichkeit dass sich kein Wasser im Notkühlbecken befindet ist eher gering.

Punkt 15 der HAZOP-Studientabelle (zu hohe Temperaturen des Thermoöls aufgrund von fehlendem Kühlwasser für den Notkühlbetrieb) benötigt **keine speziellen Sicherheitsanforderungen**.

**Ursache: Einfrieren des Kühlwassers im Notkühler oder des Wassers aus dem Fernwärmenetz beim Betriebswärmeübertrager**

Es könnte zu einer Erhöhung der Thermoöltemperatur kommen, wenn das Thermoöl über den Betriebswärmeübertrager läuft, auf der anderen Seite des Sicherheitswärmeübertragers das Wasser gefroren ist und somit die Energieabnahme nur mehr vermindert gegeben ist. Die Temperatur des Thermoöls kann auch steigen, wenn der Notkühlkreislauf aktiviert ist und das Wasser, das sich im Notkühlbecken befindet, gefroren ist. Auch in diesem Fall ist die Energieabnahme reduziert. Um das Einfrieren des Notkühlwassers zu verhindern, wird der Notkühlbehälter immer im Gebäude aufgestellt. Im Falle des Biomasseheizkraftwerks Großarl steht der Kühlwasserbehälter neben dem Kessel. Ergänzend zu den Schutzvorrichtungen die vom HAZOP-Team erarbeitet wurden, dient auch der Sicherheitstemperaturbegrenzer TZA+ 1.900 als Schutzvorrichtung, der bei steigender Temperatur die Sicherheitskette auslöst. Daneben ist auch noch die Isolierung des Fernwärmenetzes zu nennen, die das Einfrieren des Fernwärmenetzes verhindert. Selbst wenn es zu einer Eisbildung des Wassers im Wärmeübertrager „Notkühler“ kommen sollte, wird bei aktiviertem Notkühlbetrieb das Eis geschmolzen und die Wärmeabnahme ist nur vorübergehend vermindert. Deshalb ist der Punkt 16 der HAZOP-Studientabelle **nicht sicherheitstechnisch relevant**.

**5.1.2.2 Zu niedrige Temperatur des Thermoöls**

Wie bereits zu Beginn des Kapitels 5.1.2 „Abweichung der Temperatur“ erwähnt, bringt eine zu niedrige Temperatur des Thermoöls keine sicherheitstechnischen Gefahren mit sich. Es leidet

jedoch die Effektivität des Thermoölkreislaufs unter diesen niedrigen Temperaturen. Denn bei verringerter Temperatur

- steigt die Viskosität des Thermoöls und
- die spezifische Wärmekapazität des Thermoöls nimmt ab.

Die kinematische Viskosität von „Therminol 66“ (Thermoöl des Biomasseheizkraftwerks Großarl) verändert sich beispielsweise wie folgt:

- $300\text{ }^{\circ}\text{C} : 0,53\text{ mm}^2/\text{s}$
- $260\text{ }^{\circ}\text{C} : 0,63\text{ mm}^2/\text{s}$
- $200\text{ }^{\circ}\text{C} : 0,99\text{ mm}^2/\text{s}$

(WTS - Wagner Technik Service, 2013)

Im Regelbetrieb beträgt die Vorlauftemperatur des Thermoöls rund  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  und die Rücklauf-temperatur schwankt zwischen  $250$  und  $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Wird das Thermoöl im Kessel nun weniger stark erhitzt, steigt die kinematische Viskosität. Dadurch verändert sich die Reibung an den Rohrwänden und an den Ventilen. Dies führt zu Druckverlusten innerhalb der Verrohrung. Im Endeffekt wird sich der Stromverbrauch der Umwälzpumpe erhöhen, da sich die kinematische Viskosität erhöht.

Die spezifische Wärmekapazität von „Therminol 66“ verhält sich folgendermaßen:

- $300\text{ }^{\circ}\text{C} : 2,58\text{ kJ}/(\text{kg} * \text{K})$
- $260\text{ }^{\circ}\text{C} : 2,44\text{ kJ}/(\text{kg} * \text{K})$
- $200\text{ }^{\circ}\text{C} : 2,22\text{ kJ}/(\text{kg} * \text{K})$

(WTS - Wagner Technik Service, 2013)

Die spezifische Wärmekapazität, also die gespeicherte Wärmeenergie pro Kilogramm Thermoöl, ist umso geringer je niedriger die Temperatur gewählt wird.

Aus diesen beiden Gründen wird die Einsatztemperatur des Thermoöls möglichst hoch gehalten. Gegen eine sehr hohe Einsatztemperatur spricht hingegen wieder die schnellere Alterung (siehe Kapitel 5.1.5.1). Es besteht ein Trade-off zwischen hoher Effektivität und schneller Alterung des Thermoöls.

#### **Ursache: Verschmutzter Kessel**

Eine Ursache für eine zu niedrige bzw. eine sinkende Thermoöltemperatur kann ein verschmutzter Thermoölkessel sein. Wenn die beiden Rohre, die durch den Kessel gehen, von außen durch Anbackungen verschmutzt sind, vermindert sich der Wärmeübergang vom Rauchgas auf das

Thermoöl. Je nachdem wie stark die Ablagerungen auf den Rohren sind, kann die Rauchgastemperatur nach dem Kessel stark ansteigen und die Thermoöltemperatur im Vorlauf stark absinken. Als Schutzvorrichtung vor zu hohen Rauchgastemperaturen nach dem Thermoölkessel und vor dem Thermoöl-Economizer dient der Sicherheitstemperaturbegrenzer TZA+ 1.250. Eine Temperaturanzeige im Vorlauf kann Aufschluss auf sinkende Thermoöltemperaturen geben. Dieser Temperatursensor ist jedoch kein Sicherheitstemperaturbegrenzer und ist auch nicht mit der Sicherheitskette verbunden, sondern dient lediglich der Anzeige der Thermoöltemperaturen im Vorlauf.

Zur Vermeidung von rauchgasseitigen Ablagerungen an den Thermoölrohren wird im Biomasseheizkraftwerk Großarl ein Abreinigungssystem verwendet, welches mit Druckluft die Heizflächen von Ablagerungen befreit.

Der Punkt 17 der HAZOP-Studientabelle (niedrige Thermoöltemperaturen aufgrund eines verschmutzten Kessels) beeinflusst zwar die Wirtschaftlichkeit eines Biomasseheizkraftwerks mit Thermoölkreislauf, ist jedoch **nicht sicherheitstechnisch relevant**.

### **Ursache: Zu viel Wärmeabnahme**

Die Temperatur des Thermoöls kann auch sinken, wenn die Wärmeabnahme im Fernwärmenetz steigt. Bei erhöhter Wärmeabnahme sinkt kurzzeitig die Temperatur im Thermoölkreis. Da die Vorlauftemperatur im Normalfall auf 300 °C geregelt ist, wird in Folge mehr Biomasse in den Feuerraum geschoben, somit erhöhen sich die Rauchgastemperaturen und das Thermoöl im Kessel wird wieder auf die 300 °C aufgeheizt. Der Punkt 18 der HAZOP-Studientabelle (zu niedrige Thermoöltemperaturen aufgrund zu großer Wärmeabnahme) ist **sicherheitstechnisch nicht relevant**.

### 5.1.3 Abweichung des Drucks

Bei der Erwärmung von Thermoöl kommt es zu einer Volumenausdehnung der Wärmeträgerflüssigkeit. Tabelle 5.1 zeigt die Volumenausdehnung des im Biomasseheizkraftwerk Großarl verwendeten Thermoöls „Therminol 66“ mit steigender Temperatur. Erhitzt man das Thermoöl von Raumtemperatur (25 °C) auf die im Normalfall geregelte Vorlauftemperatur von ca. 300 °C, nimmt das Volumen des Thermoöls um 22,8 % seiner ursprünglichen Größe zu. Die Rohrleitungen können eine Volumenausdehnung dieser Art keinesfalls

Temperatur in °C	Volumenzunahme in Prozent
25	–
50	1,77
100	5,40
150	9,18
200	13,50
250	17,90
300	22,80
325	25,33
345	27,43

**Tabelle 5.1:** Volumenausdehnung Therminol 66 (National Institute of Standards and Technology (NIST), 2013)

alleine bewältigen. Deshalb gibt es ein Ausdehnungsgefäß, welches im oberen Bereich der Anlage montiert ist und über eine unabsperrbare Ausgleichsleitung mit dem Sammelgefäß verbunden ist (siehe R&I-Schema des Thermoölkreislaufs im Anhang). Der höchste Druck im Thermoölkreislauf wird auf der Druckseite der Umwälzpumpe (in Fließrichtung direkt nach der Pumpe) erreicht. Auf der Druckseite der Umwälzpumpe wird ein durchschnittlicher Druck von 6 bar erreicht. Auf der Saugseite der Umwälzpumpe liegt der Druck bei ca. 0,25 bar. Der Thermoölkreislauf ist über den Entgaser mit dem Ausdehnungsgefäß verbunden. Das Sicherheitsventil, welches den Thermoölkreislauf und das Ausdehnungsgefäß vor zu hohem Druck schützt, ist auf einen zulässigen Betriebsdruck von 10 bar ausgelegt. Steigt der Druck über 10 bar, öffnet das Sicherheitsventil und das Thermoöl entweicht. Das Ausdehnungsgefäß ist mit dem Sammelgefäß über eine unabsperrbare Ausgleichsleitung verbunden. Im Sammelgefäß und auch im Ausgleichsgefäß bedeckt ein Inertgas (Stickstoff im Falle des Biomasseheizkraftwerks Großarl) das Thermoöl (wegen der geringeren Dichte liegt der Stickstoff auf dem Thermoöl). Das Sammelgefäß ist mit einem weiteren Sicherheitsventil gegen zu hohen Druck abgesichert. Dieses Sicherheitsventil ist auf einen Überdruck von 0,5 bar ausgelegt und öffnet bei Überschreitung, damit das Thermoöl gefahrlos ins Freie gelangen kann.

Doch trotz Ausdehnungsgefäß, Sammelgefäß und der Sicherheitsventile kann es unter bestimmten Umständen zu bedrohlichen Situationen kommen. Diese werden in diesem Kapitel besprochen. Zum einen wird ein

- zu hoher Druck im System und ein
- zu niedriger Druck im System

beschrieben und erläutert.



Abbildung 5.2: Ausdehnungsgefäß



Abbildung 5.3: Sammelgefäß

### 5.1.3.1 Zu hoher Druck im System

Die Folgen von zu hohem Druck im Thermoölkreislauf sind im Allgemeinen bedrohlicher einzuschätzen als die von zu geringem Druck. Im Regelbetrieb wird ein hoher Druck im Zusammenspiel von Ausgleichsleitungen, Ausdehnungsgefäß, Sammelgefäß und Sicherheitsventilen ausgeglichen. Die folgenden drei Unterpunkte beschäftigen sich mit möglichen Ursachen von zu hohen Systemdrücken und deren Konsequenzen.

#### Ursache: Absperrung Thermoölkessel und thermische Ausdehnung

Dieser Unterpunkt ist stark mit den Abweichungen von verringertem Durchfluss verwandt. Wenn es zu einer Absperrung des Thermoölkessels kommt, entweder durch eine Verstopfung der Rohrleitungen oder durch unzulässiges Verschließen von Handventilen, steht das Thermoöl und wird im Kessel immer stärker erhitzt. Das verursacht eine Überhitzung von Thermoöl im Bereich des Kessels und es entstehen Verkokungen. Durch die steigenden Temperaturen im Thermoöl kommt es zu einer thermischen Ausdehnung und dadurch zu einem Druckanstieg im System. Bei weiterer Wärmezufuhr kann das Thermoöl verdampfen. Der Druck steigt, die Rohre können diesem hohen Druck ab einem bestimmten Punkt nicht mehr standhalten und bekommen Risse oder brechen sogar. Dadurch tritt heißes Thermoöl aus. Das austretende Thermoöl kann zu schweren Verbrennungen an Personen, die sich im Anlagenbereich aufhalten führen. Des Weiteren besteht höchste Brandgefahr, vor allem im Kesselbereich.

Als Schutzvorrichtung dient die hartverdrahtete Strömungssicherung FZA-- 1.910 (Differenzdruckschalter). Wird ein bestimmter Mindestdurchfluss unterschritten schlägt der Durchflusssensor Alarm, die Sicherheitskette springt an, die Feuerung geht in einen Not-Stopp und der Notkühlkreislauf wird aktiviert. Weiters sollen die Sicherheitsventile unzulässig hohe Betriebsdrücke verhindern. Das Sicherheitsventil im Bereich des Ausdehnungsgefäßes ist auf einen zulässigen Betriebsdruck von 10 bar ausgelegt und das Sicherheitsventil im Bereich des Sammelgefäßes ist auf einen zulässigen Betriebsüberdruck von 0,5 bar eingestellt.

**Gefahrenklasse: C<sub>2</sub>, F<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>**

- C<sub>2</sub>: Die Konsequenzen reichen bis zum Bersten von Rohrleitungen (Austritt von 300 °C heißem Thermoöl) und zum Brand des Kessels und der gesamten Anlage. Da in einem Biomasseheizkraftwerk in der Regel, außer den Bediensteten, wenige Leute anwesend sind, können auch nicht viele verletzt oder gar getötet werden.
- F<sub>1</sub>: Die Bediensteten verbringen den Großteil ihrer Arbeitszeit in der Schaltwarte. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Bediensteten in der Anlagenhalle liegt bei unter 10 % der Arbeitszeit.
- P<sub>2</sub>: Wenn der Thermoölkessel abgesperrt ist sollte der Durchfluss innerhalb kürzester Zeit wiederhergestellt werden, ansonsten kommt es zu extremen Druckverhältnissen im Kesselbereich. Sollte der Thermoölkessel abgesperrt sein - aus welchem Grund auch immer - kann im Normalfall nicht schnell genug reagiert werden. Damit sind die Konsequenzen unabwendbar.
- W<sub>2</sub>: Es wird von einer mittleren Eintrittswahrscheinlichkeit ausgegangen (ein Ereignis alle 4-20 Jahre).

Damit fällt der Punkt 19 der HAZOP-Studientabelle (zu hoher Druck des Thermoöls aufgrund einer Absperrung des Thermoölkessels und thermischer Ausdehnung) unter die Kategorie **SIL 1**.

**Ursache: Hohe Stickstoffmenge**

Es kann zu überhöhten Druckwerten im Ausdehnungs- und im Sammelgefäß kommen, wenn die Stickstoffzufuhr vergrößert wird und die Sicherheitsventile nicht ordnungsgemäß funktionieren. Der Stickstoff dient im Biomasseheizkraftwerk Großarl als Inertgas im Ausdehnungs- und im Sammelgefäß und „bedeckt“ das Thermoöl. Als Schutzvorrichtung vor zu hohem Druck dient das Sicherheitsventil am Ausdehnungsgefäß, welches auf einen zulässigen Überdruck von 10 bar ausgelegt ist und das Sicherheitsventil am Sammelgefäß, das auf einen Überdruck von 0,5 bar eingestellt ist. Sind diese Sicherheitsventile nicht funktionsfähig und ist die Zufuhr von Stickstoff zu hoch, kann es zu unzulässig hohen Belastungen der beiden Behälter kommen. Dies führt in Folge dazu, dass die Behälter bersten und heißes Thermoöl entweicht. Das austretende Thermoöl stellt eine große Gefahr für die Bediensteten dar und Brandgefahr ist unmittelbar gegeben.

**Gefahrenklasse: C<sub>2</sub>, F<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>**

- C<sub>2</sub>: Die Konsequenzen reichen bis zum Bersten des Ausdehnungs- und Sammelgefäßes (Austritt von 300 °C heißem Thermoöl) und zum Brand der gesamten Anlage. Da in einem Biomasseheizkraftwerk in der Regel, außer den Bediensteten, wenige Leute anwesend sind, können auch nicht viele verletzt oder gar getötet werden.

- F<sub>1</sub>: Die Bediensteten verbringen den Großteil ihrer Arbeitszeit in der Schaltwarte. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Bediensteten in der Anlagenhalle liegt bei unter 10 % der Arbeitszeit.
- P<sub>2</sub>: Sollten die Sicherheitsventile nicht funktionsfähig sein, wird bei einer Temperatur- und damit Volumenausdehnung des Thermoöls und einer verstärkten Zufuhr von Stickstoff, der Druck steigen, bis einer der beiden Behälter berstet. Sind die Sicherheitsventile nicht funktionsfähig sind die Konsequenzen vorprogrammiert und nicht mehr rechtzeitig abwendbar.
- W<sub>2</sub>: Es wird von einer mittleren Eintrittswahrscheinlichkeit ausgegangen (ein Ereignis alle 4-20 Jahre), dass hohe Stickstoffmengen einen erhöhten Druck auf die Behälter ausüben.

Damit fällt der Punkt 20 der HAZOP-Studientabelle (erhöhter Druck im Ausdehnungsgefäß und im Sammelgefäß aufgrund einer hohen Stickstoffmenge) unter die Kategorie **SIL 1**.

### **Ursache: Verstopfte Ausgleichsleitung**

Wenn die Ausgleichsleitung, die das Ausdehnungsgefäß mit dem Sammelgefäß verbindet, verstopft ist und das Sicherheitsventil nicht funktioniert, kann sich der Druck im Ausdehnungsgefäß unzulässig erhöhen. Die Ausgleichsleitung sorgt für einen regen Austausch von Thermoöl zwischen den beiden Gefäßen und ist somit dafür verantwortlich, dass thermische Volumenänderungen des Thermoöls ausgeglichen werden. Kann das Thermoöl jedoch plötzlich nicht mehr in den Sammeltank strömen, erhöht sich der Druck im Ausdehnungsgefäß immer weiter. In weiterer Folge können die Behälter bersten und das Thermoöl tritt aus. Aufgrund der Aufstellung im oberen Bereich der Anlage, kann das Bersten dieses Behälters fatale Folgen haben. Eine ausreichende Dimensionierung der Ausgleichsleitung (im Falle der Anlage in Großarl: DN 65 Rohre) sollte vor Verstopfungen schützen. Eine weitere Schutzvorrichtung ist das Sicherheitsventil und die Niveaumessung LSA+ im Ausdehnungsgefäß, die zur Beobachtung des Füllstandes verwendet wird.

### **Gefahrenklasse: C<sub>2</sub>, F<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, W<sub>1</sub>**

- C<sub>2</sub>: Die Konsequenzen reichen bis zum Bersten des Ausdehnungsgefäßes (Austritt von 300 °C heißem Thermoöl) und zum Brand der gesamten Anlage. Da in einem Biomasseheizkraftwerk in der Regel, außer den Bediensteten, wenige Leute anwesend sind, können auch nicht viele verletzt oder gar getötet werden.
- F<sub>1</sub>: Die Bediensteten verbringen den Großteil ihrer Arbeitszeit in der Schaltwarte. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Bediensteten in der Anlagenhalle liegt bei unter 10 % der Arbeitszeit.
- P<sub>2</sub>: Wenn die Ausgleichsleitung verstopft ist, das Sicherheitsventil nicht mehr funktioniert und sich das Volumen weiter ausdehnt, können die oben besprochenen Konsequenzen nicht mehr abgewendet werden.

- $W_1$ : Die Eintrittswahrscheinlichkeit ist gering (ein Ereignis seltener als alle 20 Jahre). Die Ausgleichsleitung hat eine Nennweite von DN 65. Diese Nennweite entspricht nach der DIN 11850, Reihe 2 einem Innendurchmesser von 66 mm (DIN 11850, 2009). Die beim Thermoölkreislauf des Biomasseheizkraftwerks in Großarl verwendete Nennweite der Ausgleichsleitung entspricht den Vorgaben der Norm (DIN 4754, 1994).

Punkt 21 der HAZOP-Studientabelle (hoher Druck im Ausdehnungsgefäß aufgrund einer Verstopften Ausgleichsleitung) benötigt **keine speziellen Sicherheitsanforderungen**.

### 5.1.3.2 Zu niedriger Druck im System

Auch niedrige Drücke können die Sicherheit von Personen und der Anlage gefährden. Es können Unterdrücke entstehen, die das Material überfordern und damit zerstören. Die folgenden drei Unterpunkte beschäftigen sich mit geringem bzw. zu niedrigem Druck.

#### Ursache: Verstopfte Filter/Schmutzfänger

Im Thermoölkreislauf befinden sich vor den beiden Umwälzpumpen Filter, die Verschmutzungen davon abhalten durch die Pumpe zu gehen. Wächst der Grad der Verschmutzung im Filterbereich kann sich der Durchfluss des Thermoöls vermindern und der Druck auf der Pumpenseite verringert sich. Durch den niedrigen Druck können Strömungsprobleme auftreten, die im schlimmsten Fall eine Kavitation im Bereich der Pumpen verursachen können. Die kleinen Bläschen, die sich bei einer Kavitation durch den niedrigen Druck bilden und dann schlagartig wieder zerplatzen, können starke mechanische Schäden an der Pumpe hervorrufen. Durch den geringeren Durchfluss kann es im Bereich des Kessels wieder zu Überhitzungen des Thermoöls kommen. Diese Konsequenz ist sicherheitstechnisch am kritischsten anzusehen. Eine weitere Auswirkung wäre der erhöhte Stromverbrauch der Pumpen, der sich durch die Verschmutzung im Filterbereich ergibt.

Als Schutzvorrichtung dienen wiederum die beiden hartverdrahteten Strömungssicherungen FZA- - 1.910, die den ordnungsgemäßen Durchfluss überwachen. Sinkt der Durchfluss nach dem Kessel unter einen bestimmten Mindestwert, löst der FZA- - 1.910 die Sicherheitskette aus, der Notkühlkreislauf springt an und die Feuerung geht in einen Not-Stopp. Somit muss das Thermoöl nicht mehr durch den verschmutzten Filter strömen und der Durchfluss ist wiederhergestellt. Eine weitere Schutzvorrichtung ist das Sicherheitsventil, wobei vermutlich zuerst die Strömungssicherung aktiv wird.

#### Gefahrenklasse: $C_2$ , $F_1$ , $P_1$ , $W_2$

- $C_2$ : Die große Gefahr geht hierbei wieder vom überhitzten Thermoöl im Kesselbereich aus. Die Konsequenzen reichen bis zum Bersten von Rohrleitungen (Austritt von 300 °C heißem Thermoöl) und zum Brand des Kessels und der gesamten Anlage. Da in einem

Biomasseheizkraftwerk in der Regel, außer den Bediensteten, wenige Leute anwesend sind, können auch nicht viele verletzt oder gar getötet werden.

- $F_1$ : Die Bediensteten verbringen den Großteil ihrer Arbeitszeit in der Schaltwarte. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Bediensteten in der Anlagenhalle liegt bei unter 10 % der Arbeitszeit.
- $P_1$ : Bevor es zu einer Überhitzung des Thermoöls im Kesselbereich kommt, wird man Unregelmäßigkeiten bei den Umwälzpumpen feststellen. Damit kann noch rechtzeitig reagiert werden und die Gefahren durch Überhitzungen im Kesselbereich können abgewendet werden.
- $W_2$ : Es wird von einer mittleren Eintrittswahrscheinlichkeit ausgegangen (ein Ereignis alle 4-20 Jahre). Das Eintreten des Ereignisses, dass ein Filter vor der Umwälzpumpe verstopft und somit für einen niedrigen Druck auf der Saugseite der Pumpe sorgt, ist recht wahrscheinlich. In so einem Fall sollte die redundant ausgeführte zweite Umwälzpumpe eingesetzt werden und der Schmutzfilter gereinigt oder ausgewechselt werden.

Punkt 22 der HAZOP-Studientabelle (niedriger Druck im Thermoöl auf der Saugseite der Pumpe aufgrund eines verstopften Filters) benötigt **keine speziellen Sicherheitsanforderungen**.

#### **Ursache: Verstopfte Ausgleichsleitung und Abkühlen des Systems**

Sollte die Ausgleichsleitung zwischen Ausdehnungs- und Sammelgefäß verstopft sein, kann kein Austausch von Thermoöl zwischen den beiden Behältern mehr stattfinden. Kommt es nun zu einer Abkühlung des Thermoöls, verringert sich auch dessen Volumen und das Niveau im Ausdehnungsgefäß sinkt. Im Normalfall kommt es dann zu einem Austausch zwischen Ausdehnungs- und Sammelgefäß. Da die verbindende Ausgleichsleitung jedoch verstopft ist, sinkt der Druck im Ausdehnungsgefäß weiter ab. Dadurch wird der Behälter unzulässig stark belastet. Im schlimmsten Fall kommt berstet der Behälter und Thermoöl tritt aus. Als Schutz dient auch hier, wie in Punkt 21 der HAZOP-Studientabelle die Ausgleichsleitung die als DN 65 dimensioniert ist. Der Niveausensor LSA+ gibt Auskunft über den Flüssigkeitsstand im Ausdehnungsgefäß.

#### **Gefahrenklasse: $C_1$ , $F_1$ , $P_2$ , $W_1$**

- $C_1$ : Das Schadensausmaß beim Bersten des Ausdehnungsgefäßes aufgrund eines starken Unterdrucks ist geringer, als beim Bersten aufgrund zu hohen Drucks. Während bei zu hohem Druck der Behälter platzt und das Thermoöl in alle Richtungen spritzt, entsteht beim Bersten aufgrund niedrigen Drucks meist ein Riss, aus dem das Thermoöl dann herausrinnt. Somit ist das Schadensausmaß in diesem Fall geringer und es besteht für die wenigen Bediensteten nur ein leichtes Verletzungsrisiko.
- $F_1$ : Die Bediensteten verbringen den Großteil ihrer Arbeitszeit in der Schaltwarte. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Bediensteten in der Anlagenhalle liegt bei unter 10 % der Arbeitszeit.

- P<sub>2</sub>: Wenn die Ausgleichsleitung verstopft ist und der Thermoölkreislauf abkühlt, verliert das Thermoöl an Volumen. Löst sich die Verstopfung dann nicht, sind die Konsequenzen nicht mehr abwendbar.
- W<sub>1</sub>: Die Eintrittswahrscheinlichkeit ist gering (ein Ereignis seltener als alle 20 Jahre).

Punkt 23 der HAZOP-Studientabelle (niedriger Druck im Ausdehnungsgefäß aufgrund einer verstopften Ausgleichsleitung und Abkühlen des Systems) benötigt **keine speziellen Sicherheitsanforderungen**.

#### **Ursache: Ausfall der Stickstoffversorgung und Abkühlen des Systems**

Wenn der Thermoölkreislauf abkühlt verringert sich das Volumen des Thermoöls und es strömt Stickstoff nach, um den Volumenverlust auszugleichen. Fällt jedoch die Stickstoffversorgung aus und das System kühlt ab, sinkt der Druck im Ausdehnungs- und im Sammelgefäß immer weiter. Das kann dazu führen, dass die Behälter derart stark belastet werden, dass sie dem Unterdruck nicht mehr stand halten, bersten und heißes Thermoöl ausströmen lassen. Im Normalfall strömt der Stickstoff automatisch, ab einem bestimmten Druckniveau, aus der Stickstoffflasche in das Sammelgefäß nach. Als Schutzvorrichtung dient ein so genannter Vakuumbrecher der zwischen dem Sammelgefäß und der Stickstoffflasche angeordnet ist.

#### **Gefahrenklasse: C<sub>1</sub>, F<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>**

- C<sub>1</sub>: Das Schadensausmaß beim Bersten des Ausdehnungs- und Sammelgefäßes aufgrund eines starken Unterdrucks ist geringer, als beim Bersten aufgrund zu hohen Drucks. Während bei zu hohem Druck der Behälter platzt und das Thermoöl in alle Richtungen spritzt, entsteht beim Bersten aufgrund niedrigen Drucks meist ein Riss, aus dem das Thermoöl dann herausrinnt. Somit ist das Schadensausmaß in diesem Fall geringer und es besteht für die wenigen Bediensteten nur ein leichtes Verletzungsrisiko.
- F<sub>1</sub>: Die Bediensteten verbringen den Großteil ihrer Arbeitszeit in der Schaltwarte. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Bediensteten in der Anlagenhalle liegt bei unter 10 % der Arbeitszeit.
- P<sub>2</sub>: Fällt der Vakuumbrecher aus, wird kein Stickstoff mehr in den Sammeltank nachgefüllt. Wird der Thermoölkreislauf dann heruntergekühlt und die Stickstoffversorgung nicht innerhalb kürzester Zeit wieder funktionsfähig gemacht, sind die Konsequenzen unabwendbar.
- W<sub>2</sub>: Es wird von einer mittleren Eintrittswahrscheinlichkeit ausgegangen (ein Ereignis alle 4-20 Jahre).

Punkt 24 der HAZOP-Studientabelle (niedriger Druck im Ausdehnungs- und im Sammelgefäß aufgrund eines Ausfalls der Stickstoffversorgung und Abkühlen des Systems) benötigt **keine speziellen Sicherheitsanforderungen**.

### 5.1.4 Abweichung durch Vermischung

Der Thermoölkreislauf ist ein geschlossenes System, bei dem auf der einen Seite Wärme zugeführt wird (Thermoölkessel) und auf der anderen Seite die Wärme abgegeben wird (ORC-Wärmeübertrager, Betriebswärmeübertrager). In diesem Kreislauf befindet sich ausschließlich Thermoöl, welches als Wärmeträgermedium ständig zirkuliert. Damit es zu keiner Vermischung mit anderen Substanzen kommt, wird Stickstoff als Inertgas verwendet. Im Bereich der Wärmeübertrager besteht die Gefahr, dass bei einer Leckage des Wärmeübertragers andere Flüssigkeiten in den Thermoölkreislauf gelangen oder das Thermoöl in die andere Flüssigkeit übergeht. Um einen möglichst guten Wärmeübergang zu gewährleisten, wird die Trennwand im Wärmeübertrager möglichst dünn ausgeführt. In der Praxis werden Trennwände mit einer Dicke von 0,5 bis 3 mm eingesetzt. In folgenden Bereichen des Thermoölkreislaufs kommt es zu einem Wärmeübergang mit anderen Medien und hier besteht die Gefahr der Vermischung:

- Beim Wärmeübertrager ORC kann das ORC-Medium im Falle einer Leckage in den Thermoölkreislauf gelangen oder das Thermoöl in den ORC-Kreislauf.
- Der Betriebswärmeübertrager ist ein Sicherheitswärmeübertrager. Das bedeutet, dass eine Vermischung der beiden Flüssigkeiten extrem unwahrscheinlich bis unmöglich ist. Das Trennmedium welches sich zwischen den beiden Flüssigkeiten befindet ist Luft und diese Luft steht unter atmosphärischem Druck. Der Sicherheitswärmeübertrager in Großarl wurde von der Maxxtec GmbH gebaut und geliefert. Sollte das Thermoöl oder das Wasser im Sicherheitswärmeübertrager austreten, läuft die Flüssigkeit in ein Leckagebecken, welches mit dem Sensor XZA überwacht wird und mit der Sicherheitskette verbunden ist. Ein Leck auf beiden Seiten des Sicherheitswärmeübertragers und ein Übertreten der Flüssigkeiten in den „fremden“ Kreislauf, ist praktisch unmöglich und wird deshalb nicht behandelt.
- Im Bereich des Wärmeübertragers „Notkühler“ kann Wasser in den Thermoölkreislauf und auch Thermoöl in das mit Wasser befüllte Kühlbecken gelangen.

Dieses Kapitel teilt sich in die Vermischung von Thermoöl und ORC-Medium, welche beim Wärmeübertrager ORC stattfinden kann und die Vermischung von Thermoöl und Wasser, welche beim Betriebswärmeübertrager und beim Notkühler auftreten kann.

#### 5.1.4.1 Vermischung Thermoöl mit ORC-Medium

Wie oben bereits erwähnt kann es nur im Bereich des Wärmeübertragers ORC und nur bei einem Riss im Wärmeübertrager zu einer Vermischung dieser zwei Substanzen kommen. Die größere Gefahr besteht dabei, wenn das ORC-Medium in den Thermoölkreislauf gelangt. Der Grund dafür wird in den beiden nachfolgenden Unterpunkten erläutert.

### Ursache: ORC-Medium kommt in den Thermoölkreislauf

Dieser Punkt (Punkt 25 der HAZOP-Studientabelle) wurde im Zuge der HAZOP-Studie nicht vollständig geklärt und deshalb in der HAZOP-Studientabelle mit einem Viereck gekennzeichnet. In den folgenden Zeilen wird versucht den offenen Punkt abschließend zu erläutern.

Bei einer Beschädigung des ORC-Wärmeübertragers kann das ORC-Medium in den Thermoölkreislauf eindringen. Die gängigsten ORC-Arbeitsmedien, die im Sektor der Biomasseverbrennung eingesetzt werden, sind Butylbenzene, Propylbenzene, Ethylbenzene, Toluene und OMTS (Octamethyltrisiloxane) (Drescher and Brüggemann, 2006). Die Siedepunkte und das Molekulargewicht dieser Substanzen sind in der folgenden Tabelle aufgelistet.

chemische Substanz	Summenformel	Siedetemperatur in K	Siedetemperatur in °C	Molekulargewicht in kg/kmol
Butylbenzen	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	456,455	183,305	134,21816
Propylbenzol	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	432,391	159,241	120,19158
Ethylbenzol	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	409,350	136,200	92,13842
Toluene	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	383,780	110,630	92,13842
OMTS	C <sub>8</sub> H <sub>24</sub> O <sub>2</sub> Si <sub>3</sub>	425,700	152,550	236,53146

**Tabelle 5.2:** ORC-Arbeitsmedien mit Kennzahlen

(American Institute of Chemical Engineers, Design Institute for Physical Properties (DIPPR), 2004)

Das ORC-Modul in Großarl wurde von der Firma Turboden srl. gebaut und geliefert. Das mitgelieferte ORC-Medium hat den Namen „Turboden Power 1“. Aus dem Sicherheitsdatenblatt des ORC-Mediumherstellers (Dow Corning) geht hervor, dass es sich um das Silikonöl OMTS handelt.

Ein Großteil der für den ORC-Prozess verwendeten Substanzen sind reine Kohlenstoff-Wasserstoff-Verbindungen (Butylbenzen, Propylbenzol, Ethylbenzol und Toluene), allein das OMTS beinhaltet noch weitere chemische Elemente und weicht auch deshalb mit den Kennzahlen etwas von den anderen ORC-Arbeitsmedien ab. Bei der Betrachtung der Siedepunkte fällt auf, dass allesamt zwischen 110 °C und 184 °C liegen. Die Siedepunkte der Thermoöle und im speziellen Fall von Therminol 66, welches in der Beispielanlage Großarl verwendet wird, liegen wesentlich höher (Therminol 66: 359 °C) (Solutia Inc., 2011). Das bedeutet, dass sich der Siedepunkt des Thermoöls senken wird, wenn das ORC-Medium des ORC-Prozesses in den Thermoölkreislauf eindringt. Die Absenkung des Siedepunktes hängt von der Menge des eintretenden ORC-Mediums ab.

Des Weiteren kommt es zu einer Absenkung der Haltedruckhöhe der Umwälzpumpe. Der Absolutdruck des Thermoöls verringert sich, wenn sich ORC-Medium dazu mischt (niedriger Siedepunkt des ORC-Mediums). Der Verdampfungsdruck muss auf der Saugseite der Pumpe immer kleiner sein, als der gesamte, absolute Druck, der an dieser Stelle vorhanden ist. Ist dies nicht der

Fall, verdampft die Flüssigkeit auf der Saugseite der Pumpe. Diese kleinen Blasen implodieren dann schlagartig bei Druckerhöhung in der Pumpe, verursachen damit große Turbulenzen und können die Pumpe beschädigen. Es besteht somit die Gefahr von Kavitation. Das Unternehmen Turboden s.r.l. konstruiert ORC-Module, wie beispielsweise im Biomasseheizkraftwerk Großarl eingesetzt, und hat Experimente zur Vermischung von Thermoöl mit ORC-Medium durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass bis zu einem Anteil von 0,5% ORC-Medium im Thermoöl keine Probleme auftreten. Des Weiteren gibt es auch keinen Nachweis möglicher chemischer Reaktionen zwischen ORC-Medium und Thermoöl (Turboden s.r.l., sa).

Da die beiden Flüssigkeiten keine chemischen Reaktionen eingehen und die Dichte auch sehr unterschiedlich ist, kommt es im Normalfall zu keiner Vermischung der beiden Substanzen. Das Molekulargewicht von Butylbenzen, Propylbenzol, Ethylbenzol und der Toluene liegt zwischen 92 und 135 kg/kmol. Das Thermoöl „Therminol 66“ besteht aus hydriertem Terphenyl, Polyphe-nyl und Terphenyl und hat ein durchschnittliches Molekulargewicht von 252 kg/kmol (Solutia Europe S.A./N.V., 1998). Auch OMTS hat bei Raumtemperatur (25 °C) eine geringere Dichte ( $820 \text{ kg/m}^3$ ) als das Thermoöl Therminol 66 ( $1004,5 \text{ kg/m}^3$ ) (National Institute of Standards and Technology (NIST), 2013), (BRB International B.V., 2011). Deshalb schwimmt das ORC-Medium, aufgrund der geringeren Dichte, auf dem Thermoöl. Diese ORC-Mediumblasen sollten keine Probleme bereiten, wenn sie durch den Thermoölkreislauf bis zum Entgaser mittransportiert und dort abgeschieden werden. Problematisch wird es nur dann, wenn sie an einer Stelle im Thermoölkreis verweilen.

### **Konsequenzen**

Sollte die Trennwand des Wärmeübertragers ORC tatsächlich beschädigt werden, kann es dazu kommen, dass das ORC-Medium in den Thermoölkreislauf übergeht. Dies führt, je nach übergewandener Menge des ORC-Mediums, zu einer mehr oder weniger starken Herabsetzung des Siedepunktes des Thermoöls. Ist der Wärmeübertrager stark beschädigt und strömt viel vom ORC-Medium in den Thermoölkreislauf, kann sich der Siedepunkt derart weit absenken, dass es zu einer lokalen Kesselrohrüberhitzung mit Verdampfung des Thermoöls kommen kann. Das könnte eine derartige Druckerhöhung verursachen, dass die Kesselrohre reißen und das heiße Thermoöl austritt. Dann besteht eine Gefahr für das anwesende Personal und eine akute Brandgefahr.

Des Weiteren erhöht die Absenkung der Haltedruckhöhe der Pumpe, die Gefahr von Kavitation. Fällt der Absolutdruck auf der Saugseite der Pumpe unter den Verdampfungsdruck des mit dem ORC-Medium „verschmutzten“ Thermoöls, kommt es zur Verdampfung (Gasblasenbildung). Die kleinen Bläschen implodieren in der Pumpe bei Druckerhöhung abrupt und können dabei die Mechanik der Pumpe zerstören.

Wenn die ORC-Mediumblasen, die aufgrund der niedrigeren Dichte auf dem Thermoöl schwimmen, nicht mehr mit der Strömung mitgerissen werden, sammeln sie sich an, erwärmen sich, verdampfen, das Volumen und der Druck steigt an und das führt zu Rissen im Röhrensystem.

Sollte einmal das ORC-Medium in den Thermoölkreislauf gelangen, wird es in der Regel mit der Strömung mitgerissen, bis zum Entgaser transportiert und dort abgeschieden werden. Dies sollte gleichermaßen wie die Entfernung von Niedersiedern und Wasser bei der ersten Aufwärmung des Thermoölkreislaufs ablaufen. Zur Kontrolle muss das Thermoöl zumindest einmal im Jahr getestet werden (Probeentnahmestelle). Durch eine geeignete Kesselkonstruktion (ohne Winkel und starke Kurven) sollte verhindert werden, dass ORC-Mediumblasen im Kreislauf verweilen können. Eine gleichmäßige Strömung ist wichtig. Durch eine genaue Überwachung des Niveausensors LSA+ im Ausdehnungsgefäß, könnte unter Umständen, zusätzlich vorhandenes Öl (ORC-Medium) im Thermoölkreislauf entdeckt werden. Durch regelmäßige Rundgänge könnten Geräusche im Bereich der Pumpen, die auf eine bevorstehende Kavitation hinweisen, früh entdeckt werden.

#### **Gefahrenklasse: C<sub>2</sub>, F<sub>1</sub>, P<sub>1</sub>, W<sub>2</sub>**

- C<sub>2</sub>: Die Konsequenzen reichen bis zum Bersten von Rohrleitungen (Austritt von 300 °C heißem Thermoöl) und zum Brand des Kessels und der gesamten Anlage. Da in einem Biomasseheizkraftwerk in der Regel, außer den Bediensteten, wenige Leute anwesend sind, können auch nicht viele verletzt oder gar getötet werden.
- F<sub>1</sub>: Die Bediensteten verbringen den Großteil ihrer Arbeitszeit in der Schaltwarte. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Bediensteten in der Anlagenhalle liegt bei unter 10 % der Arbeitszeit.
- P<sub>1</sub>: Wenn sich große Mengen des ORC-Mediums in den Thermoölkreislauf mischen, ist der ORC-Prozess gestört und sendet direkt ein Signal in die Schaltwarte. Von dort wird der Thermoölkreislauf dann sicher heruntergefahren. Wie bereits oben erwähnt, entstehen durch kleine Mengen des ORC-Mediums im Thermoölkreislauf keinerlei Probleme. Bevor es zu Gefahren im Thermoölkreislauf kommt, sendet das ORC-Modul schon diverse Fehlermeldungen, auf die die Bediensteten reagieren können.
- W<sub>2</sub>: Es wird von einer mittleren Eintrittswahrscheinlichkeit ausgegangen (ein Ereignis alle 4-20 Jahre). Die Wahrscheinlichkeit, dass es eine Leckage im Wärmeübertrager ORC gibt und das ORC-Medium übertritt ist recht unwahrscheinlich.

Nachdem nun dieser offene Punkt mit Hilfe von Literatur geklärt wurde, ergibt sich dennoch keine neue Einschätzung der Gefahrenklasse. Punkt 25 der HAZOP-Studientabelle (Vermischung von ORC-Medium in den Thermoölkreis) benötigt **keine speziellen Sicherheitsanforderungen**.

#### **Ursache: Thermoöl kommt in den ORC-Kreislauf**

Wenn der Wärmeübertrager ORC beschädigt ist, kann dies dazu führen, dass Thermoöl in den ORC-Kreislauf übergeht. Das Thermoöl fließt dann direkt in den Verdampfer des ORC-Prozesses. Durch den hohen Siedepunkt des Thermoöls verdampft es nicht und aufgrund seiner

Dichte, welche - wie zuvor erwähnt - höher ist, als die des ORC-Mediums, sammelt es sich in den untersten Rohren des Verdampfers an. Dies führt zu einer Leistungsreduktion des ORC-Moduls. Wenn sehr große Mengen des Thermoöls in den Verdampfer des ORC-Prozesses gelangen, kann es dazu führen, dass ein Teil des Thermoöls durch die Turbine mitgezogen wird. Dies führt jedoch lediglich zu einer Verringerung des elektrischen Wirkungsgrades (Turboden s.r.l., sa).

Sollte Thermoöl in den ORC-Kreislauf eingedrungen sein, kann man dies an der Temperatur im Verdampfer feststellen. Im Normalfall befindet sich die Temperatur im Verdampfer konstant, einige Grad Celsius, über der Verdampfungstemperatur des ORC-Mediums. Sinkt die Temperatur im Verdampfer ab und nähert sich immer mehr der Verdampfungstemperatur, ist das ein Indiz dafür, dass Thermoöl in den ORC-Kreislauf eingedrungen ist.

Kommt Thermoöl in den ORC-Prozess und damit in das ORC-Medium, führt dies zu Leistungseinbußen, jedoch nicht zu Situationen, die die Sicherheit der Bediensteten oder der Anlage gefährden. Deshalb ist Punkt 26 der HAZOP-Studientabelle (Vermischung von Thermoöl in den ORC-Kreislauf) **sicherheitstechnisch nicht relevant**.

### 5.1.4.2 Vermischung Thermoöl mit Wasser

An zwei Punkten des Thermoölkreislaufes kann es zu einer Vermischung von Thermoöl mit Wasser kommen. Zum einen im Bereich des Betriebswärmeübertragers, zum anderen im Bereich des Notkühlers. Da es sich beim Betriebswärmeübertrager um einen Sicherheitswärmeübertrager handelt, kann es nur theoretisch zu einer Vermischung von Thermoöl und Wasser in diesem Bereich kommen. Die Wahrscheinlichkeit, dass beide Wände des Sicherheitswärmeübertragers beschädigt sind und das Thermoöl in den Wasserkreislauf ge-



**Abbildung 5.4:** Betriebswärmeübertrager in Grossarl

langt, oder umgekehrt, ist praktisch unmöglich, weshalb dieses Szenario im Zuge der HAZOP-Studie nicht untersucht wurde. Bei einer Beschädigung einer Wand des Sicherheitswärmeübertragers, fließt entweder das Thermoöl oder das Wasser in das Leckagebecken. Das Leckagebecken wird vom Sensor XZA überwacht und löst bei einer Leckage die Sicherheitskette aus. Wenn der XZA die Sicherheitskette auslöst, wird der Notkühlkreislauf aktiviert (Umwälzpumpen schalten ab) und die Feuerung geht in den Not-Stopp. In den folgenden beiden Unterpunkten wird nur ein Versagen des Wärmeübertragers „Notkühler“ untersucht.

**Ursache: Wasser kommt in den Thermoölkreislauf**

Wenn der Notkühler ein Leck hat, kann dies dazu führen, dass Wasser in den Thermoölkreis übergeht. Die Auswirkungen, die dabei zu befürchten sind, sind prinzipiell dieselben wie bei Punkt 25 der HAZOP-Studientabelle angeführt. Ein zu beachtender Unterschied besteht jedoch darin, dass das Thermoöl im Normalbetrieb nicht über den Notkühlkreislauf fließt.

Kommt es nun tatsächlich dazu, dass der Notkühlkreislauf aktiviert und der Notkühler beschädigt ist, kann Wasser in den Thermoölkreislauf gelangen. Durch das eindringende Wasser wird sich der Siedepunkt des Thermoöls herabsetzen, denn Wasser siedet bekanntlich bei rund 100 °C während das Thermoöl erst bei einer Temperatur von 359 °C verdampft. Je nachdem wie viel Wasser eindringt, senkt sich die Verdampfungstemperatur des Thermoöls ab. Des Weiteren verursacht Wasser im Thermoölkreislauf auch ein Absenken der Haltedruckhöhe der Pumpe. Dabei wird, wie bereits unter Punkt 25 der HAZOP-Studientabelle beschrieben, der Druck auf der Saugseite der Pumpe niedriger und führt schließlich zu Kavitation. Da das Molekulargewicht von Wasser (H<sub>2</sub>O: 18,01528 (American Institute of Chemical Engineers, Design Institute for Physical Properties (DIPPR), 2004)) wesentlich niedriger ist, als das des Thermoöls wird sich das Wasser nicht mit dem Thermoöl vermischen, sondern sich auf der Oberfläche, in Form von Gasblasen, ansammeln.

Durch die Herabsetzung des Siedepunktes von Thermoöl und die Gasblasenbildung im Thermoölkreislauf, kann es zu lokalen Kesselrohrüberhitzungen kommen. Dabei kann ein Teil des mit Wasser „verschmutzten“ Thermoöls verdampfen. Dies führt aufgrund einer Volumenvergrößerung zu Rissen im Rohrsystem im Bereich des Kessels. Dabei kann heißes Thermoöl austreten und die Gesundheit der Bediensteten gefährden. Die Brandgefahr im Anlagenbereich ist dann stark erhöht.

Sollte sich Wasser aus dem Notkühlbecken in den Thermoölkreislauf mischen, wird das spätestens der Flüssigkeitsstandbegrenzer im Notkühlbecken (LZA- 6.1.7.150) aufdecken, wenn dieser eine Störabschaltung auslöst. Eine andere wichtige Schutzvorrichtung ist der Entgaser, der sich vor den beiden Umwälzpumpen befindet. Kommt Wasser, oder auch eine andere Substanz in den Thermoölkreislauf, sollte diese Substanz bis zum Entgaser mitgezogen werden und dort den Kreislauf wieder verlassen. Dabei ist eine gute und dafür geeignete Kesselkonstruktion Voraussetzung. Eine geeignete Kesselkonstruktion sorgt für eine gleichmäßige und starke Durchströmung der Rohre, um damit das Verweilen von Thermoöl oder Fremdstoffen, wie Wasser, zu verhindern. Der Niveausensor im Ausdehnungsgefäß (LSA+) könnte unter Umständen auch Aufschluss darüber geben, ob sich Wasser zum Thermoöl hinzugemengt hat. Regelmäßige Rundgänge können dafür sorgen, dass eine Kavitation im Bereich der Pumpen schnell erkannt wird und dann der Fehler im System entdeckt wird.

Eine weitere Sicherheitsvorrichtung vor eindringendem Wasser ist der Betriebswärmeübertrager, der als Sicherheitswärmeübertrager konstruiert ist.

**Gefahrenklasse: C<sub>2</sub>, F<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, W<sub>1</sub>**

- C<sub>2</sub>: Die Konsequenzen reichen bis zum Bersten von Rohrleitungen (Austritt von 300 °C heißem Thermoöl) und zum Brand des Kessels und der gesamten Anlage. Da in einem Biomasseheizkraftwerk in der Regel, außer den Bediensteten, wenige Leute anwesend sind, können auch nicht viele verletzt oder gar getötet werden.
- F<sub>1</sub>: Die Bediensteten verbringen den Großteil ihrer Arbeitszeit in der Schaltwarte. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Bediensteten in der Anlagenhalle liegt bei unter 10 % der Arbeitszeit.
- P<sub>2</sub>: Sollte Wasser im Bereich des Notkühlers in den Thermoölkreislauf eintreten und sich dort ansammeln und ein Begrenzer oder eine Sicherheitseinrichtung im Kreislauf die Sicherheitskette auslösen, sind die Konsequenzen nicht mehr abwendbar. Durch die Aktivierung des Notkühlkreislaufs verringert sich die Länge des Thermoölkreislaufs und durch das Wasser senkt sich die Siedetemperatur ab. Das verursacht Verdampfungen, eine Vergrößerung des Volumens und damit unzulässige Belastungen des Rohrsystems.
- W<sub>1</sub>: Die Eintrittswahrscheinlichkeit ist gering (ein Ereignis seltener als alle 20 Jahre). Die Wahrscheinlichkeit, dass Wasser im Bereich des Notkühlers in den Thermoölkreislauf eindringt und zu dieser Zeit der Notkühlkreislauf aktiviert wird, ist sehr gering. Bemerkt man, dass Wasser im Bereich des Notkühlers eindringt, wird man den Thermoölkreislauf gesichert herunterfahren (nicht über den Notkühlkreislauf).

Punkt 27 der HAZOP-Studientabelle (Vermischung von Wasser in den Thermoölkreislauf) benötigt **keine speziellen Sicherheitsanforderungen**.

**Ursache: Thermoöl kommt in das Wasser**

Wird der Notkühlkreislauf aktiviert, fließt das heiße Thermoöl direkt vom Kesselvorlauf Richtung Notkühler. Dort gibt das Thermoöl einen Teil seiner Energie an das Wasser ab. Das Wasser, welches sich in unmittelbarer Nähe zur Trennwand befindet oder diese sogar berührt, verdampft sofort und wird über die Abdampfeinrichtung aus der Anlagenhalle transportiert. Sollte der Wärmeübertrager, bzw. die Trennwand zwischen Thermoöl und Wasser beschädigt sein, kann Thermoöl in das Wasserbecken fließen. Das Thermoöl wird dann mit dem Wasserdampf mitgerissen und über die Abdampfeinrichtung aus der Anlagenhalle gezogen. Der mit Thermoöl verschmutzte Wasserdampf kühlt ab, das Wasser kondensiert und das Wasser mit dem Thermoöl sinkt zu Boden.

In diesem Fall kommt es zu einer Verschmutzung und eventuell auch zu einer Schädigung der Umwelt durch Thermoöl. Der Punkt 28 der HAZOP-Studientabelle (Vermischung von Thermoöl in das Wasser des Notkühlers) ist definitiv umweltrelevant, jedoch **nicht sicherheitstechnisch relevant**.

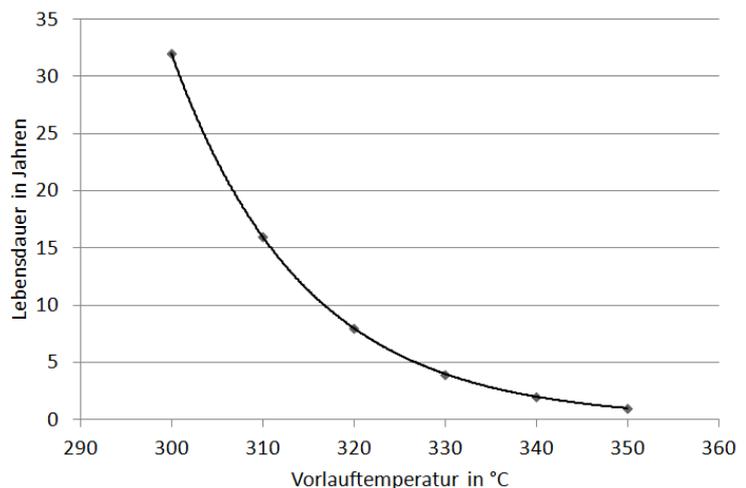
### 5.1.5 Sonstige Abweichungen

In diesem Abschnitt werden die Abweichungen vom Sollzustand besprochen, die nicht in Zusammenhang mit dem Durchfluss, der Temperatur, dem Druck oder der Vermischung mit anderen Substanzen stehen. Die Punkte 29 bis 31 der HAZOP-Studientabelle werden hier detailliert erläutert.

#### 5.1.5.1 Falsche Zusammensetzung des Thermoöls

Durch den Einsatz von Thermoöl unter einem hohen Temperaturniveau, kommt es mit der Zeit zu einer Degradierung des Thermoöls. Das Thermoöl zersetzt sich mit fortlaufender Einsatzzeit in eine Fraktion von Niedrigsiedern, Hochsiedern, Gase und Feststoffe. Diese Zersetzungsprodukte führen zum Verlust der Wärmekapazität des Thermoöls, verlängern die Aufheizzeit des Thermoöls und können auch die Sicherheit der Anlage gefährden.

Alle organischen Strukturen bzw. Verbindungen werden bei Verwendung unter hoher Hitze im Laufe der Zeit degradiert. Der Grad der Degradierung hängt von der verwendeten Vorlauftemperatur ab. Abbildung 5.5 zeigt am Beispiel des Thermoöls „Marlotherm SH“ die Lebensdauer in Abhängigkeit von der verwendeten Vorlauftemperatur. Dabei wird die Faustregel nach Arrhenius angewendet, welche besagt, dass sich die Lebensdauer des Thermoöls verdoppelt, wenn die Vorlauftemperatur um 10 °C abgesenkt wird. Das Thermoöl „Marlotherm SH“ ist dem Thermoöl „Therminol 66“ in seinen Eigenschaften sehr ähnlich und wird hier deshalb als Beispiel erwähnt. Laut DIN 4754 muss die Vorlauftemperatur so gewählt werden, dass das Wärmeträgermedium zumindest ein Jahr gebrauchsfähig bleibt (DIN 4754, 1994). Das Beispiel Marlotherm SH zeigt, dass bei einer Vorlauftemperatur von 350 °C die Nutzungsdauer des Thermoöls ein Jahr beträgt. Wird die Vorlauftemperatur auf 300 °C reduziert, erhöht sich die Lebensdauer exponentiell und beträgt dann 32 Jahre (Sasol Olefins & Surfactants GmbH, 2013a).



**Abbildung 5.5:** Lebensdauer Marlotherm SH (eigene Darstellung)

Aufgrund der erhöhten Wärmekapazität und der sinkenden Viskosität liegt die Versuchung nahe die Vorlauftemperatur möglichst hoch zu wählen, um die Wirtschaftlichkeit der Anlage zu erhöhen. Durch eine hohe Vorlauftemperatur sinkt jedoch die Lebensdauer des Thermoöls,

welches dadurch früher ersetzt werden muss. Es ergibt sich somit ein Trade-off zwischen erhöhter Wirtschaftlichkeit und erhöhter Lebensdauer des Thermoöls. Da die Kosten für Thermoöl recht hoch sind (ca. 4 Euro für ein kg Thermoöl „Marlotherm SH“ (Sasol Olefins & Surfactants GmbH, 2013b)) und im Biomasseheizkraftwerk Großarl 23000 Liter Wärmeträgerflüssigkeit benötigt werden, ergeben sich dementsprechend hohe Investitionskosten. Deshalb versucht man in der Regel das Thermoöl möglichst lange zu verwenden.

Das Thermoöl zersetzt sich also nach einer bestimmten Gebrauchszeit. Durch eine hohe Vorlauftemperatur und kurzfristig unzulässig starke Erhitzungen, wird der Prozess der Degradierung beschleunigt. Im Zuge der Degradierung/Zersetzung bilden sich Niedrigsieder, Hochsieder, Gase und Feststoffe im Thermoöl. Die Niedrigsieder können den Siedepunkt herabsetzen, Gasblasen bilden und durch das Verdampfen den Druck im System erhöhen (Volumenausdehnung). Der Entgaser dient dabei als Schutzvorrichtung und sollte die Fraktion der Niedrigsieder und der Gase wieder aus dem Kreislauf entfernen, ansonsten droht Kavitation im Pumpenbereich. Die aromatischen Strukturen der Hochsieder lösen sich im Thermoöl, die nicht-aromatischen Strukturen verursachen Verkokungen. Die Verkokungen verengen den Querschnitt, verringern den Durchfluss, damit steigt die Temperatur und es kann zu lokalen Kesselrohrüberhitzungen kommen. Als weitere Konsequenz können die Rohre beschädigt werden und dadurch heißes Thermoöl austreten lassen. Dann besteht höchste Brandgefahr und die Gesundheit der Angestellten ist bedroht (Sasol Germany GmbH - Marlotherm, 2002).

Als Schutzvorrichtung dient neben dem Entgaser auch eine geeignete Kesselkonstruktion, die für eine gleichmäßige und starke Durchströmung sorgen soll, um das Verweilen von Niedrig- und Hochsiedern in einem bestimmten Abschnitt des Thermoölkreislaufs zu verhindern. Zusätzlich sollten häufiger als ein Mal pro Jahr Thermoölproben entnommen und auf Zersetzungsprodukte überprüft werden. Verkokungen können mit Hilfe der Strömungssicherung detektiert werden (FZA-- 1.910).

### **Gefahrenklasse: C<sub>2</sub>, F<sub>1</sub>, P<sub>1</sub>, W<sub>2</sub>**

- C<sub>2</sub>: Die Konsequenzen reichen bis zum Bersten von Rohrleitungen (Austritt von 300 °C heißem Thermoöl) und zum Brand des Kessels und der gesamten Anlage. Da in einem Biomasseheizkraftwerk in der Regel, außer den Bediensteten, wenige Leute anwesend sind, können auch nicht viele verletzt oder gar getötet werden.
- F<sub>1</sub>: Die Bediensteten verbringen den Großteil ihrer Arbeitszeit in der Schaltwarte. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Bediensteten in der Anlagenhalle liegt bei unter 10 % der Arbeitszeit.
- P<sub>1</sub>: Die Konsequenzen, die durch die Verwendung von veraltetem Thermoöl drohen, können abgewendet werden. Das Thermoöl degradiert sich im Laufe der Zeit. Die gesetzlich vorgeschriebene Probenahme gibt Aufschluss über die Beschaffenheit des Thermoöls.

- W<sub>2</sub>: Es wird von einer mittleren Eintrittswahrscheinlichkeit ausgegangen (ein Ereignis alle 4-20 Jahre), dass ein stärker beschädigtes Thermoöl in Verwendung ist. Durch kurzzeitige aber markante Temperaturerhöhungen, können sich vermehrt und recht schnell größere Fraktionen an Niedrig- und Hochsiedern bilden.

Punkt 29 der HAZOP-Studientabelle (falsche Konzentration/Zusammensetzung des Thermoöls aufgrund der Verwendung von veraltetem bzw. beschädigtem Thermoöl) benötigt **keine speziellen Sicherheitsanforderungen**.

#### 5.1.5.2 Veränderte Viskosität des Thermoöls

Die Viskosität des Thermoöls variiert stark mit der Temperatur. Wie bereits im Ergebniskapitel „zu niedrige Temperatur des Thermoöls“ angesprochen, sinkt die Viskosität mit steigender Temperatur (kinematische Viskosität bei 200 °C: 0,99 mm<sup>2</sup>/s und bei 300 °C: 0,53 mm<sup>2</sup>/s). Zur Erläuterung der Konsequenzen im Zuge einer veränderten Viskosität sei auf das Ergebniskapitel Temperatur 5.1.2 verwiesen (Punkt 11 bis 18 der HAZOP-Studientabelle).

#### 5.1.5.3 Stromausfall

Ein Stromausfall ist ein Szenario mit dem gerechnet werden muss. Wenn alles ordnungsgemäß funktioniert, läuft dieses Szenario folgendermaßen ab. Es kommt zum Stromausfall und die durch einen elektrischen Drehstrommotor angetriebenen Umwälzpumpen stellen ihre Funktion ein. Die Zirkulation des Thermoöls vermindert sich und stoppt schließlich. Die Strömungssicherung (der Durchflusssensor FZA-- 1.910) löst beim Unterschreiten einer Mindestdurchflussmenge direkt (hartverdrahteter Sensor) die Sicherheitskette aus. Die Funktion der Sicherheitskette wird auch bei Stromausfall nicht beeinflusst, da diese über ein Notstromaggregat läuft. Durch das Auslösen der Sicherheitskette, wird mit Hilfe einer Batterie die Dieselpumpe im Notkühlkreislauf aktiviert und das Thermoöl fließt über den Notkühler, der für Kühlung sorgt. So wird die Thermoölzirkulation wiederhergestellt und gleichzeitig ein Not-Stopp der Feuerung ausgelöst, um die Energiezufuhr zu stoppen.

Im Zuge der HAZOP-Studie wird jedoch davon ausgegangen, dass entweder die Sicherheitskette nicht mehr funktioniert oder die Dieselpumpe im Notkühlkreislauf nicht anspringt. Die Konsequenzen die dabei entstehen werden nachfolgend beschrieben.

Durch das Versagen der Sicherheitskette bzw. durch das Nichtanfahen der Dieselpumpe, wird die Zirkulation des Thermoöls nicht wieder hergestellt. Dadurch kommt es sehr schnell zu einer Überhitzung des Thermoöls im Bereich des Kessels. Dies führt zuerst zu Verkokungen, dann erreicht das Thermoöl den Siedepunkt, dadurch kommt es zum Verdampfen der Flüssigkeit und somit zu einem Druckanstieg im System. Dieser Druckanstieg kann die Rohrleitungen unzulässig stark belasteten und die Leitungen zum Bersten bringen. Die Rohre können im Bereich des Kessels reißen (Kesselversagen) oder auch außerhalb des Kesselbereichs. Durch das austretende Thermoöl besteht für Personen, die sich im Bereich der Anlagenhalle befinden, direkte Verbrennungsgefahr bei Kontakt mit dem Thermoöl. Des Weiteren besteht höchste Brandgefahr im

Kesselhaus und der Anlagenhalle.

Als Schutzvorrichtung dient der Notkühlkreislauf, der mit Hilfe einer Dieselpumpe angetrieben wird und somit die Zirkulation des Thermoöls bei Stromausfall wiederherstellt und gleichzeitig für Kühlung sorgt. Damit es zur Aktivierung des Notkühlsystems kommt, muss die Sicherheitskette auch ohne Stromversorgung ordnungsgemäß funktionieren. Deshalb ist der Durchflusssensor hartverdrahtet und die Sicherheitskette wird über ein Notstromaggregat betrieben.

**Gefahrenklasse: C<sub>2</sub>, F<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>**

- C<sub>2</sub>: Die Konsequenzen reichen bis zum Bersten von Rohrleitungen (Austritt von 300 °C heißem Thermoöl) und zum Brand des Kessels und der gesamten Anlage. Da in einem Biomasseheizkraftwerk in der Regel, außer den Bediensteten, wenige Leute anwesend sind, können auch nicht viele verletzt oder gar getötet werden.
- F<sub>1</sub>: Die Bediensteten verbringen den Großteil ihrer Arbeitszeit in der Schaltwarte. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Bediensteten in der Anlagenhalle liegt bei unter 10 % der Arbeitszeit.
- P<sub>2</sub>: Kommt es zum Stromausfall, fällt die Umwälzpumpe aus und es findet keine Zirkulation mehr statt. Wenn dann die Sicherheitskette nicht auslöst, oder die Dieselpumpe nicht funktionieren sollte, sind die Konsequenzen nicht mehr abwendbar und verheerend.
- W<sub>2</sub>: Es wird von einer mittleren Eintrittswahrscheinlichkeit ausgegangen (ein Ereignis alle 4-20 Jahre).

Damit fällt der Punkt 31 der HAZOP-Studientabelle (kein Strom aufgrund eines Stromausfalls) unter die Kategorie **SIL 1**.

### 5.1.6 Zu prüfende Punkte und Empfehlungen

Im Zuge der „Meeting“ Phase der HAZOP-Studie gab es in gewissen Punkten oder zu gewissen Funktionen Unklarheiten. Diese Punkte waren im Zuge der „Post-meeting“ Phase zu prüfen und wurden in der 5. Spalte der HAZOP-Studientabelle mit einem Stern (★) markiert und werden hier in diesem Kapitel erläutert bzw. erklärt. Des Weiteren wurden im Laufe der HAZOP-Studie Empfehlungen zur Verbesserung der Sicherheit und zur Steigerung der Effizienz des Thermoölkreislaufs formuliert, diese wurden mit einem schwarzen Punkt (●) gekennzeichnet und werden ebenfalls in diesem Kapitel näher beschrieben. Der Punkt 25 der HAZOP-Studientabelle erhielt (als einzige Abweichung) ein Viereck (◊) als Markierung. Das bedeutet, dass dieser Punkt noch nicht abschließend geklärt werden konnte und erst in der Nachbearbeitung der HAZOP-Studie mit Hilfe von Literatur vervollständigt worden ist. Dieser offene Punkt wurde im Kapitel 5.1.4.1 abschließend geklärt. Zu Beginn dieses Kapitels werden zuerst die zu prüfenden Punkte besprochen und im zweiten Teil kommen die Empfehlungen an die Reihe.

#### 5.1.6.1 Zu prüfende Punkte

Einige Punkte wurden in der „Meeting“ Phase als „zu überprüfen“ gekennzeichnet. Diese Punkte wurden in der „Post-meeting“ Phase geklärt und die Ergebnisse finden sich in diesem Kapitel.

#### Position der Druckabsicherung PZA+

Während der „Meeting“ Phase der HAZOP-Studie wurde über die Existenz und die Position des Druckbegrenzers PZA+ diskutiert. Bei der Besichtigung des Thermoölkreislaufs des Biomasseheizkraftwerks in Großarl im Anschluss an die HAZOP-Studie stellte sich heraus, dass es keinen Druckbegrenzer vor dem Betriebswärmeübertrager gibt. Das R&I-Schema zeigt fälschlicherweise einen Druckbegrenzer im Teilkreislauf Betriebswärmeübertrager. Anlass zur Diskussion gab die Tatsache, dass im Normalfall 99 % des Thermoöls über den ORC-Wärmeübertrager fließt.

#### Not-Stops der Feuerung im Bezug auf CO-Bildung

Wenn die Sicherheitskette ausgelöst wird, fließt das Thermoöl über den Notkühler und es kommt zum Not-Stopp der Feuerung. Bei einem Not-Stopp bzw. einer Notabschaltung soll ein sicherer Zustand der Feuerung erreicht werden. Das bedeutet, dass „die Zufuhr von Brennstoff oder anderen Formen von Energie in den Feuerraum so schnell wie möglich unterbrochen werden muss“ (ÖNORM EN 50156-1, 2005). Somit darf kein Brennstoff mehr in die Feuerkammer gelangen und auch die Verbrennungsluftventilatoren (Primärluft- und Sekundärluftventilatoren) müssen abgeschaltet werden. Es besteht laut den Normen keine Notwendigkeit den Rauchgasventilator abzuschalten, da dieser keine Energie dem Feuerraum zuführt. Im Falle des Biomasseheizkraftwerks Großarl wird neben den Verbrennungsluftventilatoren jedoch auch der Rauchgasventilator abgeschaltet, was dazu führt, dass die Rauchgase nur sehr langsam aus der Feuerkammer abtransportiert werden. Dadurch kommt es zu einer effizienten Wärmestromverringerng, es verbleiben jedoch große Mengen an Kohlenmonoxid (CO) in der Feuerkammer, welche eine Gefahr

für die Menschen und die Anlage darstellen können.

Der im Holz enthaltene Kohlenstoff wird in drei Stufen und verschiedenen Reaktionen schlussendlich in Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) umgewandelt. Wenn jedoch der Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) fehlt, wird das CO nicht zu  $\text{CO}_2$  oxidiert. Werden nun die Primärluft- und die Sekundärluftventilatoren abgeschaltet kommt kein Sauerstoff mehr in die Brennkammer und das CO wird nicht zu  $\text{CO}_2$  oxidiert. Das bedeutet, dass große Mengen an CO anfallen, die giftig sind. Kohlenmonoxid wirkt als Atemgift, welches sich über die Lungenbläschen legt und im schlimmsten Fall zu Erstickung führen kann. Des Weiteren können große Mengen an Kohlenmonoxid spontan verpuffen (schnelle Reaktion (Explosion) mit einer enormen Druckwelle) (van Loo, S. und Koppejan J., 2008).

### Ausfallrisiko des FZA-- 1.910

Die Strömungssicherung (der Durchflusssensor FZA-- 1.910) kann ohne weiteres als der wichtigste Begrenzer der Sicherheitskette des Thermoölkreislaufs bezeichnet werden. Wie zuvor bei den verschiedenen Abweichungen beschrieben, dient dieser in sehr vielen Fällen als Schutzvorrichtung. Die Strömungssicherung ist als Differenzdruckmessung ausgeführt, überwacht den Durchfluss der beiden Rohrgänge im Kessel und ist direkt am Vorlauf des Thermoölkessels montiert. Abbildung 5.6 zeigt einen Differenzdruckschalter des Thermoölkreislaufs der Beispielanlage in Großarl. Die in dieser Anlage verwendeten Differenzdruckschalter wurden von der Firma Fischer



**Abbildung 5.6:** Strömungssicherung in der Beispielanlage Grossarl

Mess- und Regeltechnik GmbH hergestellt. Die Differenzdruckschalter haben einen MTTFd-Wert (Erwartungswert der mittleren Zeit bis zum gefahrbringenden Ausfall) von 97 Jahren. Umgerechnet auf die Ausfallswahrscheinlichkeit der sicherheitstechnischen Funktion bei kontinuierlicher Anforderung pro Stunde ergibt das einen Wert von  $1,17686e^{-6}$ . Da keine Abweichung der HAZOP-Studie über das SIL 1 hinausgeht, sollte der Differenzdruckschalter den Anforderungen des SIL 1 entsprechen (siehe Tabelle 2.1). Die Ausfallswahrscheinlichkeit einer sicherheitstechnischen Funktion bei kontinuierlicher Anforderung pro Stunde sollte laut SIL 1 zwischen  $10^{-6}$  und  $10^{-5}$  liegen. Dies entspricht einem MTTFd-Wert zwischen 114,16 und 11,42 Jahren. Mit einem MTTFd-Wert von 97 Jahren, bzw. einer Ausfallswahrscheinlichkeit von  $1,17686e^{-6}$  pro Stunde liegt der in Großarl verwendete Differenzdruckschalter auf SIL 1 Niveau.

## **Anfahrprozedur mit kaltem Thermoöl**

Die DIN 4754 gibt folgende Regeln für das Anfahren des Thermoölkreises mit kaltem Thermoöl vor: „Bei Inbetriebnahme darf sich die Beheizung erst einschalten lassen, nachdem die Umwälzpumpe in Betrieb gesetzt wurde. Bei Kaltstart darf die Strömungssicherung überbrückt werden, bis der Wärmeträger eine Viskosität erreicht hat, die der Einstellung der Strömungssicherung entspricht. Überbrückung darf nur mit einem zusätzlichen, zuverlässigen Begrenzer oder eines Bedienungselementes ohne Selbsthaltung geschehen“ (DIN 4754, 1994). Die Berufsgenossenschaftlichen Regeln für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit (BGR) geben im Kapitel „Betreiben von Wärmeübertragungsanlagen mit organischen Wärmeträgern“ dieselben Regeln in anderem Wortlaut wieder (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, 2008).

Das bedeutet, dass im Anfahrbetrieb mit kaltem Thermoöl, die Sicherheitskette am Schaltschrank nie händisch ausgeschaltet werden darf. Denn sollte, aus welchem Grund auch immer, der Bedienstete nicht mehr in der Lage sein die Sicherheitskette am Schaltschrank wieder zu aktivieren, ist die Katastrophe vorprogrammiert. Aus diesem Grund darf die Überbrückung nur mit einem zusätzlichen, zuverlässigen Begrenzer oder einem Bedienungselement ohne Selbsthaltung durchgeführt werden.

### **Abfahrbetrieb über LZA- 6.1.7.150**

Sinkt der Flüssigkeitsstand des Notkühlbeckens unter ein bestimmtes Mindestniveau, springt der Füllstandsbegrenzer LZA- 6.1.7.150 an und löst die Sicherheitskette aus. In diesem Fall wird jedoch nicht, wie bei den anderen Begrenzern üblich, der Notkühlkreislauf aktiviert, sondern der Thermoölkreislauf geht in den gesicherten Abfahrmodus über. Das bedeutet, dass die Umwälzpumpen weiter laufen und die Feuerung in einen Not-Stopp geht.

### **Temperaturbeständigkeit der Statik**

Um festzustellen wie temperaturbeständig der Thermoölkessel in der Beispielanlage in Großarl ist, wurde der Hersteller des Thermoölkessels, die Firma HKT Hochtemperatur-Kessel-Technik GmbH versucht zu kontaktieren. Da diese Firma unauffindbar bzw. nicht zu kontaktieren ist und die Betreiber des Biomasseheizkraftwerks in Großarl auch keine Auskunft über die Temperaturbeständigkeit der Statik des Thermoölkessels geben konnten, wurde mit dem Biomasseheizkraftwerk Altenmarkt eine vergleichbare Anlage analysiert. Das Biomasseheizkraftwerk in Altenmarkt verwendet einen Thermoölkessel der Firma Maxxtec GmbH, der ebenfalls - wie das Biomasseheizkraftwerk in Großarl - keinen Rauchgaseintrittstemperaturbegrenzer vor dem Thermoölkessel besitzt. In der Betriebsanleitung des Maxxtec Thermoölkessels steht, dass die letzte Temperaturmessung im Feuerraum rund 950 °C betragen soll, um auf die angegebene Leistung zu kommen. Mit Hilfe der Regelung schwankt man im Normalfall zwischen 900 und 1000 °C. Kurzzeitige Temperaturerhöhungen bis zu 1100 °C sollten keine Probleme für die Sicherheit des Kessels und

dessen Statik darstellen. Es wird keine maximale Rauchgaseintrittstemperatur von Maxxtec angegeben. Eine maximale Rauchgaseintrittstemperatur könnte über die maximale Filmtemperatur des Thermoöls und den Wärmedurchgang durch den Stahl berechnet werden. Dies wird jedoch nicht gemacht. Wenn sich die Betreiber der Anlage an die Vorgaben der Betriebsanleitung halten und die Feuerleistungsregelung richtig arbeitet, sollte nichts passieren (Hauck, 2013).

### **Funktion des XZA**

Der Sensor XZA ist direkt unter dem Sicherheitswärmeübertrager (der Betriebswärmeübertrager in Großarl) in einem Leckagebecken positioniert. Sollte aufgrund einer Beschädigung des Sicherheitswärmeübertragers Thermoöl oder Wasser in den Zwischenbereich gelangen und in das Leckagebecken fließen, löst der Begrenzer XZA umgehend die Sicherheitskette aus. In diesem Fall werden die Umwälzpumpen abgeschaltet, der Notkühlkreislauf wird angefahren und die Feuerung geht in einen Not-Stopp.

### 5.1.6.2 Empfehlungen

Im Zuge der „Meeting“ Phase der HAZOP-Studie wurden einige Empfehlungen formuliert, die die Sicherheit des Thermoölkreislaufs verbessern, die Effizienz steigern, oder auch die Übersichtlichkeit erhöhen können. Es wurde den Betreibern des Biomasseheizkraftwerks Großarl Nahe gelegt diese Empfehlungen umzusetzen.

#### Kennzeichnung der Stellung der Handventile

In einem Thermoölkreislauf befinden sich eine Menge Handventile (siehe Abbildung 5.7). Die Stellung dieser Ventile ist jedoch nicht auf den ersten Blick erkennbar. Erst durch das Drehen am Ventil wird ersichtlich, ob und wie weit ein Ventil geöffnet bzw. geschlossen ist. Dadurch lässt sich ein fälschlicherweise geschlossenes Handventil nicht direkt optisch erkennen. Wäre die Stellung der Handventile besser ersichtlich, könnten Abweichungen wie in Punkt 1 der HAZOP-Studientabelle leichter erkannt und die Konsequenzen dadurch vermieden werden.

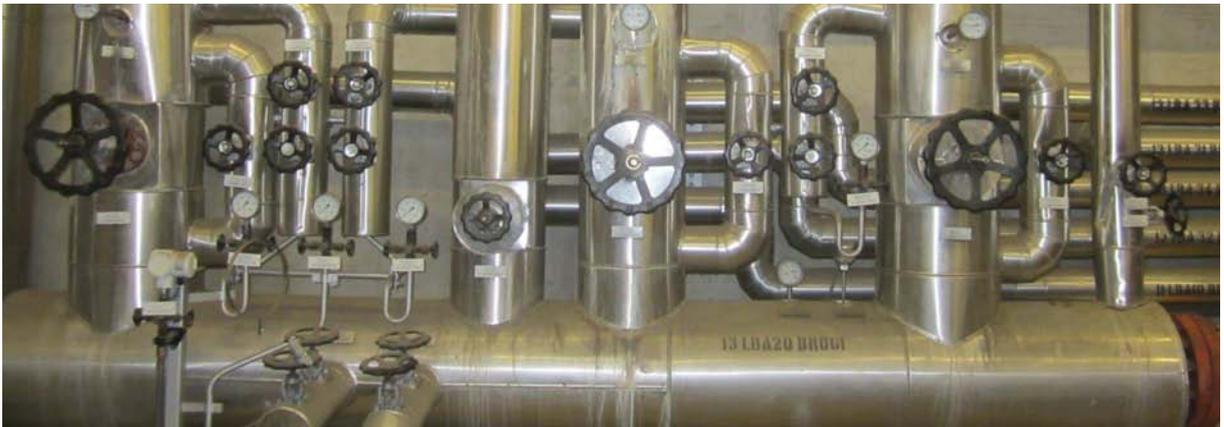


Abbildung 5.7: Handventile

Die Stellung der Handventile bzw. der Grad der Öffnung könnte relativ einfach dargestellt werden. Eine einfache, aber effiziente Möglichkeit wäre die farbliche Markierung der Spindel des Handventils. So könnte anhand der Farbe, bzw. an der Länge des Farbstreifens, optisch erkannt werden ob und in wie weit ein Ventil geöffnet ist. Dadurch würde die Sicherheit erhöht werden, da fälschlicherweise geschlossene Handventile schneller erkannt werden. Zusätzlich verkürzt und vereinfacht diese Maßnahme die regelmäßigen Kontrollrundgänge in der Anlagenhalle.

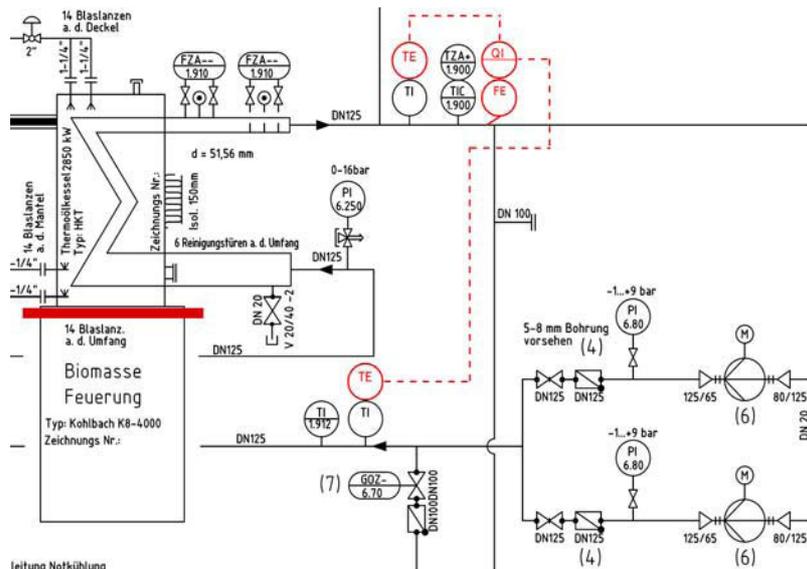
#### Einbau einer weiteren Wärmemengenanzeige (QI) zwischen Thermoölvorlauf und -rücklauf

Es befindet sich im Thermoölkreis des Biomasseheizkraftwerks Großarl ein Wärmemengenzähler im Teilkreis ORC und im Teilkreis Betriebswärmeübertrager (mit QI gekennzeichnet). Zur Berechnung der Wärmemenge bzw. der Leistung wird folgende Formel angewendet.

$$\dot{Q} = \dot{m} * c_p * (\Delta T)$$

Die Wärmemenge ( $\dot{Q}$ ) ist das Produkt des Massenstroms ( $\dot{m}$ ) mit der spezifischen Wärmekapazität des Thermoöls ( $c_p$ ) und der Differenz von Vorlauf- und Rücklauftemperatur ( $\Delta T$ ). Zur Berechnung der Leistung der beiden Teilkreise (ORC und Betriebswärmeübertrager) werden der Durchfluss und die Temperatur vor dem Eintritt in den Wärmeübertrager und nach dem Wärmeübertrager erfasst. Der  $c_p$ -Wert variiert mit dem verwendeten Thermoöl und der Einsatztemperatur. Die beiden Temperatursensoren (TE) und der Durchflusssensor (FE), sind mit der Wärmemengenanzeige (QI) verbunden.

Zusätzlich zu den beiden bereits bestehenden Wärmemengenzählern könnte ein dritter Wärmemengenzähler installiert werden, um die Leistung von ORC und Betriebswärmeübertrager gemeinsam zu erfassen. Abbildung 5.8 zeigt eine mögliche Variante wie der dritte Wärmemengenzähler eingesetzt werden könnte. Im Thermoölvorlauf wird die erste Temperatur aufgenommen und im Rücklauf wird die zweite Temperatur erfasst. Über die Temperaturdifferenz und den Durchfluss wird die gemeinsame Leistung von ORC und Betriebswärmeübertrager berechnet. Dadurch könnte die gesamte Leistung des Thermoölkreislaufs einfach und schnell erfasst und angezeigt werden.



**Abbildung 5.8:** zusätzliche Wärmemengen- bzw. Leistungsanzeige

### Leckageüberwachung im Bereich der beiden Umwälzpumpen

Austretendes Thermoöl stellt aufgrund des hohen Temperaturniveaus grundsätzlich eine große Gefahr dar. Bereits geringe Ölverluste sollten möglichst schnell entdeckt und behoben werden. Es ist jedoch oft nicht einfach kleine Leckagen zu entdecken. Im Bereich der Umwälzpumpen wäre eine Leckageüberwachung allerdings recht leicht realisierbar. Unter die Umwälzpumpen könnte man Auffangwannen stellen, die mit einem Temperaturfühler oder auch einem Druckmessgerät ausgestattet sind. Bei einer Änderung der Temperatur oder des Druckes wird ein Alarm ausgelöst und die Bediensteten können sofort darauf reagieren. So könnten auch geringe, schleichende Ölverluste im Bereich der Pumpen ausfindig gemacht werden, die sonst länger unentdeckt geblieben wären (weil der Niveausensor LZA- 6.2.2.150 noch längst nicht angeschlagen hätte). Durch die Leckageüberwachung im Bereich der Pumpen könnte die Sicherheit des Thermoölkreislaufs erhöht werden, da zumindest Ölverluste im Bereich der Pumpen direkt detektiert würden. Eine solche

Überwachung wäre ohne großen technischen oder finanziellen Aufwand möglich.

### **Einsatz einer Differenzdruckmessung**

Der Thermoölstrom teilt sich vor dem Eintritt in den Thermoölkessel in zwei Rohrleitungen und wird nach dem Kessel wieder zusammengeführt. Im Kesselbereich kommt es immer wieder zu Ablagerungen. Ablagerungen auf der Seite der Rauchgase werden größtenteils mit der Druckluft-Heizflächenabreinigung beseitigt und sind sicherheitstechnisch weniger bedenklich. Jedoch können aufgrund zu hoher Temperaturen auf der Thermoölseite der Rohre Verkokungen entstehen, die den Durchfluss und den Druck in den beiden Rohrgängen verändern und damit eine große Gefahr für die Sicherheit von Mensch und der Anlage darstellen. Der Durchfluss der beiden Rohrgänge wird mit den beiden Durchflusssensoren FZA-- 1.910 überwacht, der Druck bzw. der Differenzdruck hingegen nicht.

Um eine unterschiedliche Verschmutzung der beiden Rohrgänge und dadurch veränderte Druckwerte schneller zu identifizieren und die Sicherheit des Thermoölkreislaufs noch weiter zu erhöhen, könnte ein Differenzdrucksensor am Ende des Thermoölkessels eingebaut werden. Der Differenzdrucksensor misst die Differenz der Absolutdrücke in den beiden Rohrgängen und berechnet damit den Differenzdruck. Wenn der Differenzdruck ansteigt, ist dies ein Indiz für unterschiedlich stark verschmutzte Rohrgänge. Damit wäre es möglich Verschmutzungen in den Rohrgängen schnell und effektiv zu erkennen.

### **Temperaturmessung im Notkühlbecken installieren**

Wenn, beabsichtigt oder nicht, Thermoöl in den Notkühlkreislauf fließt und dort den Wärmeübertrager „Notkühler“ durchströmt, verdampft das Wasser im Notkühlbecken und die Temperatur im Notkühlbecken erhöht sich. Ist die Rückschlagklappe im Notkühlkreislauf defekt, kann Thermoöl vom Rücklauf in den Notkühlkreislauf und in den Notkühler gelangen. Im Normalfall müsste der austretende Wasserdampf optisch erkennbar sein, doch eine Temperaturmessung im Notkühlbecken könnte die Sicherheit noch weiter erhöhen. Das kann durchaus Sinn machen, da die Rückschlagklappen, wie bereits zuvor erwähnt, nicht sehr zuverlässig sind und kleinere Mengen an Wasserdampf womöglich übersehen werden.

### **Regelmäßige Inspektionen der Rückschlagklappen**

Im Thermoölkreislauf des Biomasseheizkraftwerks Großarl befinden sich drei Rückschlagklappen (jeweils eine auf der Druckseite der beiden Umwälzpumpen und eine am Ende des Notkühlkreislaufs). Wenn eine Rückschlagklappe versagt, kann das Thermoöl in die „falsche“ Richtung strömen. Kaputte Rückschlagklappen sind nicht sicherheitstechnisch relevant, diese können jedoch die Effizienz und die Wirtschaftlichkeit des Thermoölkreislaufs beeinträchtigen. Deshalb sollte die Funktionsfähigkeit der Rückschlagklappen regelmäßig überprüft und gegebenenfalls defekte Klappen umgehend ausgetauscht werden.

## Kontrolle der Rauchgastemperatur im Thermoölkessel

Zur Erhöhung der Sicherheit empfiehlt es sich einen weiteren Temperatursensor bzw. -begrenzer kurz vor dem Rauchgaseintritt in den Thermoölkessel zu installieren und diesen in die Sicherheitskette einzubinden. Laut DIN 4754 ist bei feuerbeheizten Kesseln (Erhitzern) eine geeignete Sicherheitseinrichtung (beispielsweise ein zuverlässiger Rauchgastemperaturbegrenzer) einzubauen, welche eine thermische Überbelastung des Kessels durch Abschaltung der Beheizung sicher verhindert (DIN 4754, 1994). So können zu hohe Rauchgastemperaturen festgestellt werden und in Folge überhöhte Filmtemperaturen und eine Überhitzung des Thermoölkessels mit all den Konsequenzen präventiv verhindert werden. Bei Erhöhung der Temperatur im Feuerraum (beispielsweise durch einen trockeneren Brennstoff), steigt die Rauchgastemperatur und bei Überschreitung der festgelegten Maximaltemperatur am Rauchgastemperaturbegrenzer vor dem Kessel, wird eine Störabschaltung ausgelöst. Das heißt, dass die Sicherheitskette aktiviert wird, der Notkühlkreislauf anspringt und die Feuerung in einen Not-Stopp geht. So kann eine unzulässige Belastung der Statik des Thermoölkessels durch zu hohe Temperaturen und eine Überhitzung des Thermoöls im Kesselbereich effizient verhindert werden. Beim Biomasseheizkraftwerk in Großarl gibt es keinen Rauchgastemperaturbegrenzer vor dem Kesseleintritt. Die Nachrüstung der Anlage mit diesem Temperaturbegrenzer ist eine dringende Empfehlung an die Betreiber des Biomasseheizkraftwerks in Großarl.

## Feuerleistungsregelung optimieren

Durch unterschiedliche Holzqualitäten und unterschiedliche Feuchtegehalte der Brennstoffe, kann die Feuerleistung teilweise stark variieren. Auch die Energieabnahme schwankt merklich sowohl über den Tag als auch über das Jahr. Um schnell und richtig auf diese Schwankungen reagieren zu können, wird eine gute Feuerleistungsregelung benötigt. Weiters muss die optimale Zufuhr von Brennstoff und Primär- und Sekundärluft geregelt werden. Diese sorgt für die „richtige Temperatur“ im Feuerraum, um eine möglichst vollständige Verbrennung zu gewährleisten. Mit einer optimierten Regelung kann Brennstoff gespart werden, die Emissionen werden gering gehalten und die Leistung bleibt konstant hoch. Dadurch werden Kosten gespart und gleichzeitig wird die Umwelt geschont.

## Einbau eines Druckbegrenzers im Ausdehnungs- und Sammelgefäß

Wie bereits in Kapitel 5.1.3 „Abweichung des Drucks“ beschrieben, kommt es, bei der Erhitzung des Thermoöls, zu einer deutlichen Volumenzunahme (über 20 %). Diese Volumenunterschiede gilt es auszugleichen. In einem Thermoölkreislauf werden dazu das Ausdehnungsgefäß und das Sammelgefäß verwendet. Diese beiden Behälter sind mit einer nicht absperzbaren Ausgleichsleitung (DN65) miteinander verbunden. Sicherheitsventile schützen das System vor zu hohem Druck. Sollte die Ausgleichsleitung verstopfen oder die Stickstoffversorgung defekt sein, kann es sowohl beim Erhitzen als auch beim Abkühlen des Systems zu unzulässigen Belastungen der

Gefäße kommen. Um derartig hohe bzw. niedrige Drücke, welche die Gefäße unzulässig belasten, früh erkennen zu können, verlangt die DIN 4754 bei geschlossenen Anlagen (wie im Beispiel von Großarl) den Einbau eines zuverlässigen Druckbegrenzers am Ausdehnungsgefäß, der mit der Sicherheitskette verbunden ist (DIN 4754, 1994). Deshalb wird dringend empfohlen am Ausdehnungsgefäß des Thermoölkreislaufs in Großarl diesen Druckbegrenzer nachzurüsten. Zur weiteren Steigerung der Sicherheit empfiehlt es sich - obwohl dies laut Norm nicht vorgeschrieben ist - auch das Sammelgefäß mit einem Druckbegrenzer auszustatten.

### Position und die Betätigung des Schnellschlussventils

Wie auf dem R&I-Schema des Thermoölkreislaufs und der Abbildung rechts ersichtlich, befindet sich das Schnellschlussventil direkt unter dem Ausdehnungsgefäß und in den meisten Fällen in unmittelbarer Nähe des Thermoölkessels. In der Beispielanlage in Großarl befindet sich das Schnellschlussventil rund einen Meter neben dem Thermoölkessel. Sollte es zu einer Leckage im Thermoölkreislauf kommen, fließt Thermoöl aus und führt in vielen Fällen direkt zum Brand. Laut Betriebsanweisung soll in diesem Fall das Schnellschlussventil betätigt werden, damit kein weiteres Thermoöl aus dem Ausdehnungsgefäß nachfließt und dann austritt. Die Problematik liegt darin, dass das Schnellschlussventil händisch betätigt werden muss. Sollten größere Mengen Thermoöl in der Anlagenhalle austreten, besteht höchste Gefahr für die Gesundheit der Bediensteten. Die Angestellten müssten durch die engen Passagen der Anlagenhalle am Thermoölkessel vorbei, das Schnellschlussventil betätigen und dann wieder die Anlagenhalle verlassen. Sollten größere Mengen Thermoöl austreten bzw. lodert bereits das Feuer im Anlagenbereich, kann es keinem Bediensteten zugemutet werden dieses Schnellschlussventil zu betätigen. Das Schnellschlussventil sollte sich laut DIN 4754 an einem Standort befinden, an dem es sicher bedient werden kann (DIN 4754, 1994).



Abbildung 5.9: Schnellschlussventil

Deshalb empfiehlt es sich das Schnellschlussventil an einer anderen Position anzubringen, wel-

che auch bei austretendem Thermoöl gut und sicher zu erreichen ist. Eine andere Möglichkeit wäre die händische Betätigung durch eine andere Betätigungsvariante zu ersetzen, die es nicht nötig macht, im Notfall noch einmal in den Bereich der Anlagenhalle gehen zu müssen.

### Durchflussüberwachung zwischen Schmutzfilter und Umwälzpumpen installieren

Im Bereich zwischen den Schmutzfiltern und den Umwälzpumpen, also auf der Saugseite unmittelbar vor den Pumpen, kann es aus den unterschiedlichsten Gründen (beispielsweise aufgrund von stark beladenen Schmutzfiltern oder einer kleinen Leckage) zu einem verringerten statischen Druck kommen. Fällt der Druck unter den Verdampfungsdruck des Thermoöls, können sich Gasbläschen in der Flüssigkeit bilden, die dann im Pumpenbereich, bei höherem Druck, schlagartig kollabieren und dabei große Schäden an der Pumpe verursachen können (Phänomen der Kavitation).

Um eine bevorstehende Kavitation leicht erkennen zu können, ohne sich dabei auf sein Gehör verlassen zu müssen (siehe nachfolgende Empfehlung „regelmäßige akustische Kontrollen der Umwälzpumpen“), empfiehlt es sich einen Durchflusssensor auf der Saugseite der Umwälzpumpen zu installieren. Abbildung 5.10 zeigt eine Möglichkeit der Durchflussmessung im Bereich der Pumpen. Druckabsenkungen vor den Pumpen hängen direkt mit dem Durchfluss zusammen, weshalb hier Durchflusssensoren eingesetzt werden.

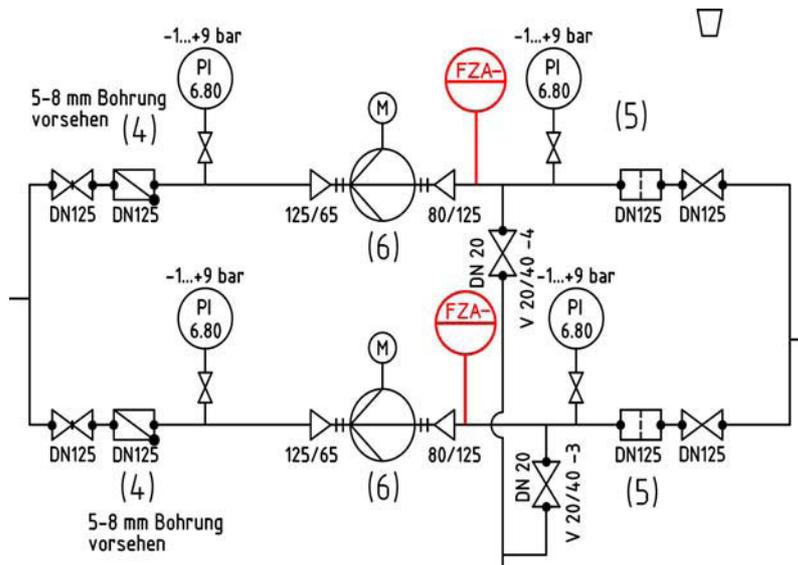


Abbildung 5.10: zusätzliche Durchflusssensoren im Pumpenbereich

Eine weitere Durchflussüberwachung im Thermoölkreis, neben dem bereits bestehenden des FZA-- 1.910, würde die Sicherheit weiter steigern.

### Position der Umwälzpumpen und der Notkühlpumpe

Wie auf der folgenden Abbildung ersichtlich, befinden sich in der Anlagenhalle des Thermoölkreislaufs in Großarl die beiden Umwälzpumpen und die Notkühlpumpe direkt nebeneinander. Dies ist sicherheitstechnisch äußerst kritisch zu beurteilen, da sich bei einem Brand im Bereich einer der beiden Umwälzpumpen, die Notkühlpumpe in der unmittelbaren Gefahrenzone befinden würde. Angenommen es bricht ein Brand im Bereich der Umwälzpumpe, die gerade in Betrieb

ist, aus, wird die Pumpe innerhalb kürzester Zeit ihren Dienst einstellen. Der Durchfluss bricht ein und die Strömungssicherung FZA- - 1.910 löst die Sicherheitskette mit dem Notkühlkreislauf aus. Daraufhin beginnt die Notkühlpumpe zu arbeiten und stellt den ordnungsgemäßen Durchfluss wieder her, währenddessen greift das Feuer auf die Notkühlpumpe über und macht diese funktionsunfähig. Der Durchfluss bricht wiederum ein, doch diesmal kann die Zirkulation des Thermoöls nicht wiederhergestellt werden. Das Thermoöl im Bereich des Kessels überhitzt und es treten die schlimmsten Konsequenzen ein.



**Abbildung 5.11:** Notkühlpumpe und die beiden Umwälzpumpen

Um die zuvor beschriebenen Auswirkungen zu verhindern, sollte die Notkühlpumpe nicht unmittelbar neben den Umwälzpumpen stationiert sein. Es wird empfohlen die Notkühlpumpe in einen anderen Raum zu versetzen oder einen Brandschutz zwischen den Pumpen zu bauen.

### **Regelmäßige Kontrolle und Reinigung der Schmutzfilter**

Auf der Saugseite der beiden Umwälzpumpen befindet sich jeweils ein Schmutzfänger, der Verschmutzungen und kleinere Feststoffe davon abhält in die Pumpe zu gelangen und diese dadurch zu beschädigen. Verschmutzungen und kleinere Feststoffanteile können im Zuge der Alterung des Thermoöls oder auch im Zuge von zu starken Erhitzungen (Verkokungen die sich lösen) entstehen. Bei starker Beladung des Schmutzfilters, kann sich der Durchfluss verringern. Dadurch können Strömungsprobleme entstehen und im weiteren Verlauf kann dies zu Kavitation im Bereich der Umwälzpumpen führen. Durch regelmäßige Kontrollen und Reinigungen der Schmutzfilter kann

dieses Risiko minimiert werden.

### Häufigere Probennahme und regelmäßigere Überprüfung des Thermoöls

Zwischen dem Sicherheitstemperaturbegrenzer TZA+ 1.900, den Abzweigungen zum ORC-Teilkreis und dem Teilkreis des Betriebswärmeübertragers befindet sich die Probeentnahmestelle (siehe Abbildung rechts). In diesem Bereich kann jederzeit eine Probe des Thermoöls entnommen werden. Die Proben können dann auf Verunreinigungen durch das ORC-Medium, Wasser, oder auf Produkte der Alterung oder Überhitzung des Thermoöls (Niedrigsieder, Hochsieder, Gase und Feststoffe) überprüft werden. Dadurch können bereits geringe Verunreinigungen festgestellt werden und so können eventuelle Schäden im Bereich der Wärmeübertrager entdeckt werden. Laut DIN 4754 muss mindestens einmal jährlich eine Thermoölprobe entnommen und analysiert werden. In bestimmten Fällen (beispielsweise nach Instandhaltungs- und Instandsetzungsarbeiten, nach einem Thermoölwechsel,...) müssen zusätzlich Proben entnommen werden (DIN 4754, 1994). Durch häufigere (mehr als gesetzlich vorgeschrieben) Analysen des Thermoöls in einem Labor, könnte man Verunreinigungen jeder Art wesentlich schneller feststellen.



Abbildung 5.12: Probeentnahmestelle

### Auskochen des Thermoöls

Durch zu starke Erhitzung des Thermoöls, oder im Zuge der Alterung des Thermoöls können sich, wie zuvor angesprochen, Niedrigsieder, Hochsieder, Gase und Feststoffe im Thermoöl bilden. Die Niedrigsieder setzen den Siedepunkt des Thermoöls herab und stellen deshalb eine Gefahr für die Anlage dar. Werden im Zuge einer Probenentnahme hohe Anteile von Niedrigsiedern und Gasen entdeckt, wird empfohlen das Thermoöl kontrolliert auszukochen, wie es bei der Inbetriebnahme einer Thermoölanlage üblich ist. Durch das Auskochen des Thermoöls, verdampfen die Niedrigsieder, Gase oder auch das eventuell enthaltene ORC-Medium oder Wasser im Bereich des Entgasers. Das Entfernen der Niedrigsiederfraktion führt dazu, dass der Siedepunkt des

Thermoöls wieder steigt und der Sicherheitsabstand der Vorlauftemperatur zur Siedetemperatur des Thermoöls dadurch wieder vergrößert wird.

### **Regelmäßige akustische Kontrollen der Umwälzpumpen**

Im Zuge der regelmäßigen und routinemäßigen Kontrollen des Thermoölkreislaufs sollte im Bereich der Umwälzpumpen bewusst und genau hingehört werden. Eine bevorstehende Kavitation kann so entdeckt und mit passenden Maßnahmen verhindert werden.

### **Nachspeisung von Wasser im Notkühlbecken überprüfen**

Das Niveau des Notkühlbeckens wird mit dem LZA- 6.1.7.150 überwacht, der beim Unterschreiten eines minimalen Wertes die Sicherheitskette auslöst. Die Nachspeisung des Wassers in das Notkühlbecken wird nicht zahlenmäßig erfasst. Das heißt, dass kleine, schleichende Wasserverluste, die beispielsweise durch einen beschädigten Notkühler oder durch Verdampfen des Wassers im Notkühlbecken verursacht werden, unentdeckt bleiben. Durch einen Wasserzähler könnte die Menge an Wasser, die dem Notkühlbecken zugeführt wird, zahlenmäßig erfasst werden und Unregelmäßigkeiten würden früher entdeckt werden.

### **Regelmäßiger Probetrieb der Dieselpumpe**

Es kann erforderlich sein, das Thermoöl über den Notkühlkreislauf laufen zu lassen, um das System zu kühlen, sei es wegen eines zu geringen Durchflusses (Sicherheitskette wird durch den FZA-- 1.910 ausgelöst), einer zu hohen Vorlauftemperatur (Sicherheitstemperaturbegrenzer TZA+ 1.900 schlägt an) oder eines anderen Grundes. Da die Gefahr einer Überhitzung besteht, muss schnellstmöglich für Kühlung gesorgt werden. Funktioniert in einem solchen Notfall die Diesel-Notkühlpumpe nicht, hätte dies verheerende Folgen. Deshalb sollte die Funktionsfähigkeit der Dieselpumpe in regelmäßigen Abständen in Probetrieben getestet werden, damit im Notfall alles komplikationslos abläuft.

### **Regelmäßiger Batteriewechsel**

Um die Dieselpumpe in Gang zu setzen, braucht es eine Batterie. Batterien haben oft nur eine geringe Lebensdauer und sollten deshalb regelmäßig gewechselt werden. Eine funktionierende Dieselpumpe bringt ohne funktionierende Batterie keine Kühlung. Als zusätzliche Sicherheit sollte immer eine Ersatzbatterie einsatzbereit in der näheren Umgebung sein.

### **Regelmäßige Kontrolle der Messinstrumente**

Die Messsensoren sind in regelmäßigen Abständen auf ihre Verschmutzung bzw. ihre Funktionsfähigkeit zu überprüfen. Sollten die Messinstrumente nicht mehr die wahren Werte liefern,

könnte dies gravierende Konsequenzen nach sich ziehen. Deshalb sollten Blenden, Temperaturfühler, etc. regelmäßig auf Verschmutzungen oder Verkokungen kontrolliert werden.

### **Regelmäßige Kontrolle der Aktorik**

Die Funktionsfähigkeit der Aktorik sollte ebenfalls in wiederholten Tests geprüft werden. Die Sicherheitsventile, die Rückschlagklappen oder auch die Drei-Wege-Ventile sollten einwandfrei funktionieren. Die Hersteller der Aktorik geben nur selten bzw. ungern Auskunft über die Ausfallswahrscheinlichkeit ihrer Geräte, da dies stark vom Betrieb und der Umgebung abhängt. In staubiger Umgebung, wie es bei Biomasseheizkraftwerken der Fall ist, kann die Ausfallswahrscheinlichkeit deutlich von den Herstellerangaben abweichen. Regelmäßige Kontrollen erhöhen auch hier die Sicherheit.

### **Kontinuierlicher Einsatzwechsel der Umwälzpumpen**

Im Thermoölkreislauf befinden sich zwei Umwälzpumpen, während im laufenden Betrieb jedoch immer nur eine im Einsatz ist. Durch regelmäßiges Umschalten sollte stets getestet werden, ob beide Umwälzpumpen einsatzfähig sind.

### **Kabeltrassenführung überdenken**

Eine fahrlässige bzw. falsche Verlegung von Kabeltrassen (beispielsweise über dem Kessel) kann im Notfall verheerende Folgen haben. Sollte sich nämlich eine Anlagenkomponente entzünden, welche sich unter einer Kabeltrasse befindet, werden diese Kabel durchschmoren und wichtige Signale nicht mehr in die Schaltwarte weitertransportieren. Bei der Verlegung der Kabel sollte darauf geachtet werden, dass die Trassen nicht im Bereich von sicherheitstechnisch kritischen Anlagenkomponenten verlaufen, sondern einen Sicherheitsabstand einnehmen.

### **Kabel mit Alu-Schutzröhren vor Hitze schützen**

Im Bereich von heißen Oberflächen sollte mit Hilfe von Aluminium ein Schutzmantel um die Kabel gelegt werden. Diese Aluminium-Schutzröhren können die Kabel im Brandfall länger funktionstauglich halten und so, wie zuvor erwähnt, noch wichtige Signale weiterleiten. Es wäre auch überlegenswert die gesamte Kabeltrasse in einen Aluminiumschutzmantel zu hüllen.

### **Rauchmelder**

Im Bereich der Anlagenhalle empfiehlt es sich in verschiedenen Bereichen einen Rauchmelder zu installieren, damit, auch im Fall dass niemand vor Ort ist, bereits die geringste Rauchentwicklung einen Alarm auslöst und den in Bereitschaft stehenden Heizwart umgehend informiert. Dadurch kann der Heizwart noch schneller auf eine gefährliche Abweichung vom Sollbetrieb reagieren.

## 5.2 Ergebnisse der Experteninterviews

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der drei Experteninterviews zu den Bränden in Biomasseheizkraftwerken mit Thermoölkreislauf behandelt. Wichtig ist hier im Vorhinein zu erwähnen, dass bei keinem der drei Brände Personen zu Schaden gekommen sind. Deshalb wurden auf die Frage nach den Schäden auch nur Sachgegenstände oder Geldschäden angegeben. Die Ergebnisse der Experteninterviews werden chronologisch dargestellt.

### 5.2.1 Experteninterview mit Herrn Manfred Mäser zum Brandereignis in Hard

*Um welche Art von Anlage handelte es sich?*

Es war eine Biomasse-Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungsanlage auf Altholzbasis. In einem Feuerraum wurde Altholz verbrannt und das heiße Rauchgas erwärmte das Thermoöl, welches eine Niedertemperatur-Absorptionskältemaschine antreibt, die einem benachbarten Industrieunternehmen Kälte liefert. Der Thermoölkreislauf treibt selbstverständlich auch ein ORC-Modul an, welches Strom produziert.

*Wer war der Betreiber der Anlage?*

Die Biostrom Erzeugungs-GmbH. Dieses Unternehmen wurde mittlerweile von der Häusle GmbH aufgekauft.

*Welches Thermoöl wurde verwendet?*

Therminol 66

*Wann ereignete sich der Brand?*

Im Oktober 2002

*In welchem Bereich des Thermoölkreislaufes entstand der Brand?*

In der thermogekühlten Zone. Bei der thermogekühlten Zone handelt es sich um einen Wärmeübertrager, der sich zwischen der Primärverbrennungszone und der Sekundärverbrennungszone direkt über dem Feuerraum befindet.

*Was war die Ursache des Brandes?*

Es entstand ein Riss in der thermogekühlten Zone (im Wärmeübertrager) - sprich Materialversagen. Durch diese Leckage ist Thermoöl ausgetreten und in die Brennkammer getropft bzw. geflossen. Durch die hohen Temperaturen in der Primärverbrennungszone des Feuerraums brannte das Thermoöl sofort in der Brennkammer.

*Wie entwickelte sich der Brand?*

Das Thermoöl kam in die Brennkammer und brannte sofort. Durch die Leckage kam immer mehr Thermoöl in die Brennkammer. Der Rauchgasventilator, der das Rauchgas abzieht, zog mit dem Rauchgas auch das brennende Thermoöl mit. So verbreitete sich das brennende Thermoöl in der ganzen Anlage und nach kurzer Zeit stand alles in Brand.

*Wie war der zeitliche Verlauf des Brandes? Wie lange dauerte der Brand?*

Der genaue Zeitpunkt der Leckage ist schwer festzustellen, aber es ereignete sich wahrscheinlich gegen 16:00 Uhr. Kurze Zeit später loderte bereits das Feuer und dicker Rauch ist aufgestiegen. Gegen 22:00 vielleicht 23:00 Uhr war anscheinend der Brand gelöscht. Bei den Aufräumarbeiten, zwei Tage später, kam wieder Sauerstoff zu dem immer noch heißen Thermoöl. Da die Thermoöltemperatur noch immer über der Zündtemperatur des Thermoöls lag, entzündete sich das

Thermoöl, durch den zur Verfügung stehenden Sauerstoff, wieder und der ganze Brand loderte noch einmal auf.

Der erste Brand dauerte ca. 6 Stunden und zwei Tage später loderte das Feuer noch einmal.

*Wie wurde reagiert als der Brand entdeckt wurde?*

Es war ein normaler Arbeitstag, deshalb war Personal in der Schaltwarte des Biomasseheizkraftwerks. Als die Leckage, bzw. das brennende Thermoöl entdeckt wurde, hat der Heizwart (Herr Mäser) die Anlage langsam zurückgefahren. Laut Herrn Mäser war dies vielleicht ein Fehler, eventuell würde er heute anders reagieren und die Anlage schneller zurückfahren. Es lagen jedoch zu dieser Zeit noch keine großen Erfahrungen mit Bränden in Biomasseheizkraftwerken mit Thermoölkreisläufen vor.

*Wie groß war der Schaden?*

Die ganze Anlage brannte bis auf ihre Grundmauern ab.

*Wurde die Anlage wieder aufgebaut?*

Ja

*Wenn ja, welche Verbesserungen wurden vorgenommen?*

Es gibt nun zusätzliche Absperrklappen im Bereich des Wärmeübertragers „thermoge Kühlte Zone“. Dadurch kann dieser Wärmeübertrager (Rohrkorbwärmeübertrager) abgesperrt werden damit kein weiteres Thermoöl, im Falle einer Leckage, nachfließt. Des Weiteren wurde eine Schnellentleerung installiert, um das Thermoöl im Notfall schnell ablassen zu können.

*Wurde der finanzielle Schaden durch die Versicherung gedeckt?*

Ja, die Versicherung hat den Riss im Wärmeübertrager akzeptiert und gezahlt.

## 5.2.2 Experteninterview mit Herrn Ing Enes Hamidovic zum Brandereignis in Toblach-Innichen

*Um welche Art von Anlage handelte es sich?*

Ein Biomasseheizkraftwerk mit einer Feuerbox mit darauf stehendem Dreizug-Thermoölkessel. Der Thermoölkreislauf treibt ein ORC-Modul an, welches Strom produziert.

*Wer war der Betreiber der Anlage?*

Die Genossenschaft Fernheizkraftwerk Toblach-Innichen

*Welches Thermoöl wurde verwendet?*

Therminol 66

*Wann ereignete sich der Brand?*

Am 03.03.2012 um 02:25.

*In welchem Bereich des Thermoölkreislaufes entstand der Brand?*

Im Bereich der Umwälzpumpen (Primärpumpen).

*Was war die Ursache des Brandes?*

Das Radiallager im Lagerträgergehäuse der Umwälzpumpe bricht aufgrund starker Vibrationen am Pumpengehäuse. Das Radiallager ist kaputt und die Dichtung kann das Thermoöl nicht zurückhalten, Thermoöl tritt aus. Durch das austretende Thermoöl kommt es zu einem Druckverlust im Bereich des Thermoölkessels und zu einer Störung der Umwälzpumpe. Im Zuge dieser Störungen springt die Sicherheitskette an und die Notkühlung wird gestartet. Dennoch tritt weiterhin Thermoöl beim Lagerträger der Umwälzpumpe aus. Das heiße Thermoöl, welches bei der Umwälzpumpe austritt, entzündet dann höchstwahrscheinlich ein Kabel und verursacht so den Brand. Die Kabel sind zwar mit einer Silikonhülle geschützt, doch dieser Schutz ist nicht ausreichend. So kam es zu einem Brand im Bereich der Umwälzpumpen, der Thermoölkessel war nur von außen, durch übergreifendes Feuer, beschädigt.

*Wie entwickelte sich der Brand?*

Der Brand entstand im Bereich der Umwälzpumpen und breitete sich dann auf andere Bereiche aus. Begünstigt wurde der Brand durch den Feinstaub, die Hitze und die hohen Kohlenmonoxidwerte. Der Thermoölkessel und andere Komponenten, welche sich in der Nähe der Umwälzpumpen befinden, wurden beschädigt bzw. zerstört.

*Wie war der zeitliche Verlauf des Brandes? Wie lange dauerte der Brand?*

Um 02:25 Uhr kommt es zum Brand und um 04:15 war das Feuer gelöscht. Der Brand dauerte damit knappe zwei Stunden.

*Wie wurde reagiert als der Brand entdeckt wurde?*

Da es an einem Samstag zum Brand kam, war niemand vor Ort. Der in Bereitschaft stehende Heizwart bekam eine Störmeldung (der Motorschutz löste einen Alarm auf dessen Mobiltelefon aus), dieser alarmierte die Feuerwehr und machte sich umgehend auf den Weg zum Heizkraftwerk. Die verständigte Feuerwehr kam ca. zeitgleich mit dem Heizwart beim Heizkraftwerk an. Als der Heizwart angekommen war, machte er noch eine Teilentleerung, um das Thermoöl vom Kessel zu evakuieren damit dieses nicht weiter nachströmt. Des Weiteren aktivierte der Heizwart das Fernwärmenetz und den Pufferspeicher händisch und sorgt so für zusätzliche Kühlung des Thermoöls (neben dem bereits aktivem Notkühlbetrieb). Parallel war die Feuerwehr mit der Bekämpfung des Brandes beschäftigt. Das Kuriose an diesem Vorfall war, dass das Thermoöl nicht beschädigt wurde und sogar weiterverwendet werden konnte.

*Wie groß war der Schaden?*

Es entstand ein beträchtlicher Schaden in der Anlagenhalle. Der Gutachter stellte einen Totschaden fest.

*Wurde die Anlage wieder aufgebaut?*

Ja, es wurde wieder eine Thermoölanlage errichtet, allerdings mit einem höheren Sicherheitsstandard.

*Wenn ja, welche Verbesserungen wurden vorgenommen?*

Eine Mittelstromfeuerung der Firma Kohlbach wurde gekauft. Es gibt nun einen Notkamin, die Umwälzpumpen sind jetzt Langsamläufer Thermoölpumpen (diese bringen weit weniger Schwingungen als die alten Pumpen). Der Pumpenlagerträger (Temperatur-, Druck-, Vibrations- und Leckageüberwachung) wird nun überwacht. Zusätzlich wurde ein neues Belüftungskonzept erstellt und einen Rauchmelder installiert. Es wurde auch beim Wiederaufbau versucht die unterschiedlichen Komponenten des Heizkraftwerks baulich voneinander zu trennen.

*Wurde der finanzielle Schaden durch die Versicherung gedeckt?*

Die Versicherung hat den buchhalterischen Zeitwert der Anlage gedeckt (Anschaffungswert minus die bisherige Abschreibung) ebenso wie den Produktionsausfall, der durch den Stillstand der Anlage entstanden ist.

### 5.2.3 Experteninterview mit Herrn Ing. Günther Seiffter zum Brandereignis in Altenmarkt

*Um welche Art von Anlage handelte es sich?*

Um eine Biomasse-Kesselanlage mit Kraft-Wärme-Kopplung. Der Thermoölkreislauf treibt ein ORC-Modul an, welches Strom produziert.

*Wer war der Betreiber der Anlage?*

Die Holzwärme Altenmarkt GmbH

*Welches Thermoöl wurde verwendet?*

Marlotherm SH

*Wann ereignete sich der Brand?*

Am 30.03.2013 um 14:57 Uhr.

*In welchem Bereich des Thermoölkreislaufes entstand der Brand?*

Beim Betriebswärmeübertrager, genau gesagt am Übergang zwischen Thermoölverrohrung und Wärmeübertrager, direkt am Flansch. Der Betriebswärmeübertrager war als Sicherheitswärmeübertrager ausgeführt.

*Was war die Ursache des Brandes?*

Die Ursache war eine undichte Flanschverbindung am Betriebswärmeübertrager. Dadurch ist zwischen dem Wärmeübertrager und der Verrohrung Thermoöl ausgetreten. Das Thermoöl tropfte heraus und entzündete sich auf der heißen Oberfläche des Rohres bzw. des Wärmeübertragers.

*Wie entwickelte sich der Brand?*

Das Thermoöl tropfte aus dem undichten Flansch heraus und entzündete sich. Umliegende, brennbare Gegenstände wie Kabel oder andere Kunststoffe die mit dem Thermoöl in Berührung kamen entzündeten sich. So breitete sich das Feuer aus, erreichte aber „nur“ die Größe eines Zimmerbrandes. Die Feuerwehr hatte den Brand schnell unter Kontrolle gebracht.

*Wie war der zeitliche Verlauf des Brandes? Wie lange dauerte der Brand?*

Nach ca. 3 Stunden war der Brand gelöscht.

*Wie wurde reagiert als der Brand entdeckt wurde?*

Der Brand ereignete sich an einem Samstagnachmittag. Zu der Zeit waren keine Bediensteten vor Ort. Die Feuerwehr und die Heizwarte waren schließlich zur etwa selben Zeit bei der Anlage. Die Heizwarte haben die Anlage kontrolliert heruntergefahren. Dies war jedoch schwierig zu steuern, da wichtige Kabel bei diesem Brand beschädigt wurden. Die Kabeltrasse führte nämlich über den Betriebswärmeübertrager und somit über das Feuer. Durch den Brand kam es zu einem Kurzschluss, dadurch war die Visualisierung nicht mehr funktionsfähig, die BCS war außer

Betrieb und auch die Steuerung war kurzzeitig weg, da auch die 24 Volt Notstromversorgung defekt war.

Als der Elektriker vor Ort war, hat dieser die Dieselpumpe händisch im Elektroverteilterraum wieder in Betrieb genommen. Durch die nun wieder funktionsfähige Dieselpumpe wurde die Notkühlung wieder aktiv.

*Wie groß war der Schaden?*

Der direkte Schaden mit den Reparaturmaßnahmen und den Wiederherstellungsmaßnahmen betrug ca. 210 000 Euro. Aufgrund des Brandes kam es zusätzlich zu einer Betriebsunterbrechung von 7 Wochen. Diese Betriebsunterbrechung kostete zwischen 60 000 und 70 000 Euro.

*Wurde die Anlage wieder aufgebaut?*

Ja, mit einigen Änderungen.

*Wenn ja, welche Verbesserungen wurden vorgenommen?*

Die Thermoöl-Dreiwege-Ventile wurden auf Druckluft umgestellt (davor war diese elektrisch). Diese wurden jedoch nur auf den aktuellen Stand der Technik gebracht, die Sicherheit stand nicht im Mittelpunkt. Die elektrische Sicherheitskette wurde verbessert. Die 24 Volt Notstromversorgung wurde aufgeteilt und extra abgesichert (um einen Totalausfall zu verhindern). Es gibt nun eine Leckageüberwachung direkt am Flansch, welche bereits bei kleinen austretenden Tropfen einen Alarm auslöst.

Zusätzlich wird es noch zu einer Adaptierung zwischen dem Rohr und dem Wärmeübertrager kommen. Die Temperaturänderungen verursachen nämlich Dehnungen, die mit Hilfe von Dehnschenkeln ausgeglichen werden können. Spezialdichtungen sind bereits jetzt angebracht.

*Wurde der finanzielle Schaden durch die Versicherung gedeckt?*

Ja, der Schaden wurde komplett gedeckt.



## 6 Diskussion

Die in Kapitel 3 (Fragestellung) aufgelisteten Fragen werden in diesem Kapitel der Reihe nach beantwortet. Die Grundlagen für die Antworten liefern die Ergebnisse aus der HAZOP-Studie und den Experteninterviews (siehe Kapitel 5.1 und 5.2).

### 1. Welches sind die gefährlichen Szenarien, die zu unkontrollierbaren Situationen führen?

Sämtliche gefährliche Szenarien (Abweichungen) wurden in der HAZOP-Studie durchgesprochen und die jeweilige Gefahr mit Hilfe eines qualitativen Risikographen beurteilt. Einige Punkte der HAZOP-Studientabelle waren nicht sicherheitstechnisch relevant, andere Punkte benötigen keine Sicherheitsanforderungen bzw. keine speziellen Sicherheitsanforderungen. Die höchsten Sicherheits-Integritätslevel (SIL), die aus der Gefahrenbeurteilung hervorgegangen sind, waren SIL 1. Keine Abweichung wurde mit SIL 2, SIL 3 oder gar SIL 4 eingestuft. Tabelle 6.1 liefert die Punkte der HAZOP-Studientabelle, die mit SIL 1 bewertet wurden und somit als die gefährlichsten Szenarien bezeichnet werden können.

Bei der Betrachtung der Tabelle 6.1 fällt auf, dass die 10 Punkte die in der HAZOP-Studientabelle mit SIL 1 bewertet wurden, mit nur drei Konsequenzketten verbunden sind.

- Bei Punkt **5** und **8** der HAZOP-Studientabelle besteht die Gefahr direkt durch das austretende Thermoöl.
- Bei den Punkten **1**, **4**, **6**, **12**, **13**, **19** und **31** überhitzt das Thermoöl im Kessel. Die Konsequenzkette sieht dann folgendermaßen aus: Überhitzung des Thermoöls im Kessel → Verkokungen → Verdampfen des Thermoöls → Druckanstieg im Kesselbereich → Rohrleitungen bersten → heißes Thermoöl tritt im Kessel aus.
- Bei Punkt **20** kommt es aufgrund von sehr hohem Druck zu unzulässig hohen Belastungen des Ausdehnungs- und Sammelgefäßes. Konsequenzkette: unzulässig hohe Belastung des Ausdehnungs- und Sammelgefäßes → der Behälter bzw. die Behälter bersten → heißes Thermoöl tritt aus den Behältern aus.

Im „worst case“ kommt es bei allen gefährlichen Szenarien zum Austritt von heißem Thermoöl. Der Austritt von heißem Thermoöl im Bereich des Kessels ist jedoch noch kritischer zu sehen als jener in anderen Bereichen des Thermoölkreislaufs. Das austretende Thermoöl

Nr.	Szenario: Konsequenz	Grund für die SIL 1 Einstufung
1	geschlossene Handventile: Überhitzung des Thermoöls im Kessel	Unabwendbarkeit der Konsequenzen
4	Pumpenausfall: Überhitzung des Thermoöls im Kessel	Unabwendbarkeit der Konsequenzen
5	Ölverlust: austretendes Thermoöl	Unabwendbarkeit der Konsequenzen und die hohe Eintrittswahrscheinlichkeit des Szenarios
6	unterschiedlich stark verschmutzte Rohrgänge: Überhitzung des Thermoöls im Kessel	hohe Eintrittswahrscheinlichkeit des Szenarios
8	Leckage auf der Druckseite der Pumpe: austretendes Thermoöl	Unabwendbarkeit der Konsequenzen und die hohe Eintrittswahrscheinlichkeit des Szenarios
12	zu große Feuerleistung oder zu geringe Energieabnahme: Überhitzung des Thermoöls im Kessel	hohe Eintrittswahrscheinlichkeit des Szenarios
13	zu hohe Temperaturen im Feuerraum: Überhitzung des Thermoöls im Kessel	hohe Eintrittswahrscheinlichkeit des Szenarios
19	Absperrung des Thermoölkessels und thermische Ausdehnung: Überhitzung des Thermoöls im Kessel	Unabwendbarkeit der Konsequenzen
20	hohe Stickstoffmengen: unzulässig hohe Belastung des Ausdehnungs- und Sammelgefäßes	Unabwendbarkeit der Konsequenzen
31	Stromausfall: Überhitzung des Thermoöls im Kessel	Unabwendbarkeit der Konsequenzen

Tabelle 6.1: die gefährlichsten Szenarien

stellt direkt eine Gefahr für die Angestellten eines Biomasseheizkraftwerks dar, oder indirekt, durch die große Wahrscheinlichkeit, dass das austretende Thermoöl einen Brand verursacht.

## 2. Decken sich die bisherigen Unfälle mit den Ergebnissen der HAZOP-Studie?

Ja, alle drei betrachteten Unfälle können einem aus Tabelle 6.1 beschriebenen gefährlichen Szenario mit Konsequenz zugeteilt werden.

- **Hard:** Punkt 5 der HAZOP-Studientabelle bzw. der Tabelle 6.1. Durch Materialversagen kam es zu einem Riss im Wärmeübertrager „thermogeühlte Zone“, der sich direkt über bzw. im Feuerraum befindet. Das verursachte einen Ölverlust im Feuerraum.
- **Toblach-Innichen:** Punkt 5 oder Punkt 8 der HAZOP-Studientabelle bzw. der Tabelle 6.1. Durch starke Vibrationen an der Umwälzpumpe kam es zum Bruch des Radiallagers. Die Dichtung konnte nur eine bestimmte Menge an Thermoöl aufnehmen, danach kam es zum Austritt von Thermoöl. Punkt 5 steht im Allgemeinen für einen Ölverlust und Punkt 8 für eine Leckage auf der Druckseite der Pumpe. Die Leckage war jedoch direkt an der Umwälzpumpe.
- **Altenmarkt:** Punkt 5 der HAZOP-Studientabelle bzw. der Tabelle 6.1. Es kam zum Austritt von Thermoöl direkt an einem undichten Flansch, welcher sich am Übergang zwischen Thermoölverrohrung und Wärmeübertrager befand.

In allen drei Fällen führte der Austritt des Thermoöls zu einem Brand. Der mit Abstand

---

schwerste Brand ereignete sich jedoch in Hard, bei dem das komplette Biomasseheizkraftwerk bis auf die Grundmauern abbrannte. In Hard kam es direkt im Kessel zu einem Ölverlust. Die sehr hohen Temperaturen im Kessel entfachten das Thermoöl sofort. Bei den anderen beiden Beispielen handelte es sich um eher kleine „Zimmerbrände“ wobei der entstandene Sachschaden trotzdem enorm hoch war.

### 3. Von welchen Elementen bzw. Komponenten des Thermoölkreislaufs geht die größte Gefahr aus?

- **Thermoölkessel:** Wie aus der HAZOP-Studientabelle und aus Tabelle 6.1 ersichtlich, stehen 7 der 10 gefährlichsten Szenarien in Zusammenhang mit einer Überhitzung des Thermoöls im Thermoölkessel.
- **Wärmeübertrager:** Wärmeübertrager sind anfällig auf Leckagen, da sie nur eine sehr dünne Trennwand besitzen. Der Brand in Hard ist auf einen Riss im Wärmeübertrager zurückzuführen.
- **Umwälzpumpe:** Im Bereich der Pumpen kann es zu starken Vibrationen kommen, denen das Material standhalten sollte. Das Brandereignis in Tobalch-Innichen zeigt, dass die Umwälzpumpen bzw. das Material der Umwälzpumpen auch nicht beliebig belastbar sind und es im Bereich der Umwälzpumpen zu Leckagen kommen kann.
- **Ausdehnungs- und Sammelgefäß:** Durch unzulässig hohe Drücke im Ausdehnungs- und Sammelgefäß, gerade beim kalten Anfahren des Thermoölkreislaufs, können diese Behälter bersten.
- **Flansch:** Die Flansche können gut und gerne als die Schwachstellen der Verrohrung angesehen werden. Wie im Beispiel von Altenmarkt, kann es an undichten Flanschen zum Austritt von Thermoöl kommen.

### 4. Sind die gesetzlichen vorgeschriebenen Sicherheitsmaßnahmen ausreichend für einen sicheren Betrieb eines Biomasseheizkraftwerks mit Thermoölkreislauf?

**Nein.** Es gibt verschiedene rechtliche Quellen, die teilweise Vorschriften zum Bau und zum Betrieb von Biomasseheizkraftwerken mit Thermoölkreislauf liefern, jedoch keine, die genau auf diese Thematik zugeschnitten sind. Deshalb enthalten diese Vorschriften (meist Normen) nur Mindestanforderungen. Diese Mindestanforderungen sollten auf jeden Fall eingehalten und als Grundlage angesehen werden auf der weiter aufgebaut wird.

Die folgenden Beispiele sind Beleg dafür.

- **Schnellschlussventil:** Die Norm verlangt, dass sich das Schnellschlussventil an einer Stelle befindet, an der es sicher bedient werden kann. Genauere Informationen gehen aus der Norm nicht hervor. In den meisten Anlagen, wie auch in Großarl, befindet sich das Schnellschlussventil, das händisch betätigt werden muss, in unmittelbarer Nähe des Thermoölkessel, da es unterhalb des Ausdehnungsgefäßes montiert ist.

- **Position der Pumpen:** Laut Norm muss es mindestens zwei Umwälzpumpen und eine Notkühlpumpe in einem Thermoölkreislauf geben. Allerdings wird nicht auf die Position dieser Pumpen eingegangen. In Großarl befinden sich die beiden Umwälzpumpen und die Notkühlpumpe unmittelbar nebeneinander (siehe Abbildung 5.11). Sollte es zu einem Brand im Bereich der Umwälzpumpen kommen, ist die Notkühlpumpe nicht lange einsatzfähig.
- **Kabeltrassenführung:** Die elektrischen Leitungen sollten durch eine Abdeckung geschützt, oder unter Putz verlegt sein. Des Weiteren sollten sie flammwidrig oder selbstverlöschend sein. Allerdings geben die Normen keine Hinweise zur Kabeltrassenführung.
- **Dieselpumpe:** Die Norm verlangt, dass es in einem Thermoölkreislauf eine Dieselpumpe (Notkühlpumpe) gibt, die mit einer Batterie gestartet wird. Allerdings müssen die Dieselpumpe und die Batterie im Notfall funktionieren. Deshalb sollten diese regelmäßig geprüft werden.

Die Ursachen der drei untersuchten Brände (Hard, Toblach-Innichen und Altenmarkt) sind nicht auf fehlende gesetzlich vorgeschriebene Sicherheitsmaßnahmen zurückzuführen. Alle drei Anlagen wurden nach dem Brand wieder aufgebaut und mit zahlreichen Verbesserungen ausgestattet, die weit über die gesetzlichen Anforderungen hinausgehen (siehe Kapitel 5.2).

## 5. Können die Gefahrenquellen eliminiert werden?

Die Gefahren eines Thermoölkreislaufs können **teilweise** eliminiert werden. Eine vollständige Beseitigung aller Risiken ist jedoch nicht möglich, da es sich um ein Kraftwerk handelt in dem verschiedene Arbeitsschritte auf sehr hohem Temperaturniveau betrieben werden. Zusätzlich stellen auch die Kosten einen Faktor dar, da mit der Sicherheitserhöhung der Anlage auch die damit verbundenen Kosten ansteigen.

Es gibt unterschiedliche Maßnahmen um die Gefahren zu vermindern bzw. zu vermeiden. Eine kleine Auswahl an Maßnahmen ist hier angeführt:

- Einsatz von Sicherheitswärmeübertragern
- Leckageüberwachung an den beiden Umwälzpumpen
- Komplette Überwachung des gesamten Thermoölkreislaufs, um bereits kleine Leckagen zu entdecken
- Redundanz der Sicherheitsventile
- Sicherere Sensorik und Aktorik im Thermoölkreislauf verwenden
- Brandschutzwände zwischen den Pumpen errichten oder Aufstellung in getrennten Räumen
- Größere Dimensionierung der Ausgleichsleitung
- Notstromversorgung aufteilen und extra absichern

## 7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die vorliegende Arbeit fasst die grundlegenden gesetzlichen Anforderungen an Biomasseheizkraftwerke, welche einen Thermoölkreislauf in Verwendung haben, zusammen. Aus verschiedenen Normen kristallisierten sich die Mindestanforderungen an die Thermoölkreisläufe heraus. Mit Hilfe der HAZOP-Studie und den Experteninterviews konnten die größten Gefahren des Thermoölkreislaufs aufgedeckt werden. Dabei wurden sowohl die einzelnen Komponenten des Thermoölkreislaufs, von denen die größte Gefahr ausgeht, beschrieben, als auch die gefährlichen Szenarien, mit all ihren Konsequenzen, angeführt. Des Weiteren wurden Empfehlungen formuliert wie Thermoölkreisläufe sicherer gestaltet werden können. Diese Vorschläge reichten von häufigeren Kontrollgängen durch die Anlagenhalle, bishin zu baulichen Veränderungen. Neben den Empfehlungen zur Verbesserung der Anlagensicherheit, konnten auch Ratschläge zur Steigerung der Effizienz und der Übersichtlichkeit gegeben werden.

Die große Bauphase der Biomasseheizkraftwerke mit Thermoölkreislauf war um die Jahrtausendwende. Bei diesen Anlagen müssen altersbedingt, demnächst Erneuerungen durchgeführt werden. Gewisse Komponenten müssen ausgetauscht und die Anlagen teilweise umgebaut werden. Im Zuge dieser Sanierungen sind Investitionen in die Sicherheit der Anlage sinnvoll. Der Umstieg auf erneuerbare Energien wird auch in Zukunft in der Europäischen Union weiter vorangetrieben und dadurch gefördert werden. Deshalb wird es in absehbarer Zukunft wieder vermehrt zum Bau von neuen Biomasseheizkraftwerken mit Thermoöl- und ORC-Kreisläufen kommen. Dabei sollten die Anlagen bereits in der Planungsphase einem höheren Sicherheitsstandard gerecht werden. Gerade im Leistungsbereich von  $300 \text{ kW}_{el}$  bis  $1,5 \text{ MW}_{el}$  sind diese Anlagen voll konkurrenzfähig (mit Heizkraftwerken auf Basis von Wasserdampf), wodurch sie für den Einsatz in ländlichen Gebieten prädestiniert sind.

Die Zeit für Verbesserungen an der Sicherheit der Thermoölkreisläufe ist jetzt gekommen. Diese Aufgabe fällt gleichermaßen in die Hände der Gesetzgeber, der Forschung und der Wirtschaft. Die Gesetzgeber sollten klare Gesetze und Normen, die speziell für Biomasseheizkraftwerke mit Thermoölkreislauf formuliert sind, verabschieden und die Mindestanforderungen an die Sicherheit von Thermoölkreisläufen erhöhen. Die universitäre und außeruniversitäre Forschung sollte beispielsweise an Überwachungssystemen für Thermoölkreisläufe arbeiten, die bereits kleinste Leckagen erkennen können. Schließlich sind auch die Unternehmen und die Lieferanten der verschiedenen Anlagenkomponenten dafür verantwortlich, ihre Produkte noch sicherer zu gestalten.



# Abbildungsverzeichnis

2.1	Flusschema eines ORC-Prozesses . . . . .	3
2.2	zur Entaschung gerade geöffnete Feuerkammer . . . . .	4
2.3	Thermoölkessel in Grossarl . . . . .	4
2.4	Bestandteile eines ORC-Moduls . . . . .	6
2.5	T-s Diagramm eines leicht überhitzten ORC-Prozesses . . . . .	7
2.6	Restrisiko und tolerierbares Risiko . . . . .	17
4.1	qualitativer Risikograph . . . . .	35
5.1	Notkühlbecken in Grossarl . . . . .	52
5.2	Ausdehnungsgefäß . . . . .	58
5.3	Sammelgefäß . . . . .	58
5.4	Betriebswärmeübertrager in Grossarl . . . . .	68
5.5	Lebensdauer Marlotherm SH (eigene Darstellung) . . . . .	71
5.6	Strömungssicherung in der Beispielanlage Grossarl . . . . .	76
5.7	Handventile . . . . .	79
5.8	zusätzliche Wärmemengen- bzw. Leistungsanzeige . . . . .	80
5.9	Schnellschlussventil . . . . .	83
5.10	zusätzliche Durchflusssensoren im Pumpenbereich . . . . .	84
5.11	Notkühlpumpe und die beiden Umwälzpumpen . . . . .	85
5.12	Probeentnahmestelle . . . . .	86



# Tabellenverzeichnis

2.1	SIL mit den zulässigen Ausfallswahrscheinlichkeiten . . . . .	19
4.1	Leitwörter und deren Bedeutung . . . . .	27
4.2	Beispiel einer HAZOP-Studientabelle . . . . .	29
5.1	Volumenausdehnung Therminol 66 . . . . .	57
5.2	ORC-Arbeitsmedien mit Kennzahlen . . . . .	65
6.1	die gefährlichsten Szenarien . . . . .	98



# Literaturverzeichnis

- American Institute of Chemical Engineers, Design Institute for Physical Properties (DIPPR) (2004). evaluated process data. <http://dippr.byu.edu/>. [Abgefragt am 07.11.2013].
- BRB International B.V. (2011). Sicherheitsdatenblatt octamethyltrisiloxane (omts).
- British Standard (2001). Hazard and operability studies (hazop studies) - application guide.
- Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (2011). Waldinventur 2007/09. [http://bfw.ac.at/030/pdf/1818\\_pi24.pdf](http://bfw.ac.at/030/pdf/1818_pi24.pdf). [Abgefragt am 11.06.2013].
- Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (2008). Energetisch und wirtschaftlich optimierte biomasse-kraft-wärmekopplungssysteme auf basis derzeit verfügbarer technologien. Technical report, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie; Energiesysteme der Zukunft.
- Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2008). Berufsgenossenschaftliche Regeln für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit, BGR 500: Betreiben von Arbeitsmitteln; Kapitel 2.27: Wärmeübertragungsanlagen mit organischen Wärmeträgern.
- DIN 11850 (2009). Rohre aus nichtrostendem Stahl für Lebensmittel und Chemie - Maße, Werkstoffe.
- DIN 4754 (1994). Wärmeübertragungsanlagen mit organischen Wärmeträgern; Sicherheitstechnische Anforderungen, Prüfung.
- Drescher, U. (2008). *Optimierungspotenzial des Organic Rankine Cycle für biomassebefeuerte und geothermische Wärmequellen*. Logos Verlag Berlin GmbH.
- Drescher, U. and Brüggemann, D. (2006). Fluid selection for the organic rankine cycle (orc) in biomass power and heat plants. *Applied Thermal Engineering* 27, 1:223 – 228.
- Dunjó Denti, J. (s.a.). *NEW TRENDS FOR CONDUCTING HAZARD & OPERABILITY (HAZOP) STUDIES IN CONTINUOUS CHEMICAL PROCESSES*. PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Hauck, H. (2013). *mündliche Mitteilung über die maximale Rauchgaseintrittstemperatur in den Thermoölkessel*. Maxxtec GmbH.
- Kaltschmitt, M., Hartmann, H., and Hofbauer, H. (2009). *Energie aus Biomasse*. Springer Verlag, Heidelberg, 2. edition.

- Khan, F. and Abbasi, S. (1998). Techniques and methodologies for risk analysis in chemical process industries. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 11:261 – 277.
- Kletz, T. (1997). Hazop - past and future. *Reliability Engineering and System Safety* 55, 1:263–266.
- Kletz, T. (2006). Accident investigation: Keep asking "why?". *Journal of Hazardous Materials* 130, 1:69–75.
- Lawley, H. (1974). Operability studies and hazard analysis. *AICHE Symposium*, 1:45–56.
- Lebensministerium (2013). Erneuerbare Energie in Zahlen - Die Entwicklung erneuerbarer Energie in Österreich im Jahr 2011. [http://www.lebensministerium.at/umwelt/energie-erneuerbar/ERneuerbare\\_Zahlen.html](http://www.lebensministerium.at/umwelt/energie-erneuerbar/ERneuerbare_Zahlen.html). [Abgefragt am 11.06.2013].
- Meuser, M. and Nagel, U. (2002). *ExpertInneninterviews - vielfach erprobt, wenig bedacht. Ein Beitrag zur qualitativen Methodendiskussion*. Westdeutscher Verlag.
- National Institute of Standards and Technology (NIST) (2013). Terminol 66. <http://www.nist.gov/>. [Abgefragt am 05.12.2013].
- ÖNORM EN 12952-7 (2013). Wasserrohrkessel und anlagenkomponenten; teil 7: Anforderungen an die ausrüstung für den kessel.
- ÖNORM EN 50156-1 (2005). Elektrische ausrüstung von feuerungsanlagen; teil 1: Bebestimmung für die anwendungsplanung und errichtung.
- ÖNORM EN 61508-1 (2011). Funktionale sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer systeme - teil 1: Allgemeine anforderungen.
- ÖNORM EN 61508-5 (2011). Funktionale sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer systeme - teil 5: Beispiele zur ermittlung der stufe der sicherheitsintegrität (safety integrity level).
- ÖNORM EN 61511-1 (2005). Funktionale sicherheit - sicherheitstechnische systeme für die prozessindustrie; teil 1: Aallgemeine, begriffe, anforderungen an systeme, software und hardware.
- ÖNORM EN 61511-3 (2005). Funktionale sicherheit - sicherheitstechnische systeme für die prozessindustrie; teil 3: Anleitung für die bestimmung der erforderlichen sicherheitsintegritätslevel.
- ÖNORM EN 746-2 (2011). Industrielle Thermoprozessanlagen; Teil 2: Sicherheitsanforderungen an Feuerungen und Brennstoffführungssysteme.
- Obernberger, I. (1997). Stand und entwicklung der verbrennungstechnik. *VDI Bericht 1319: Thermische Biomassenutzung - Technik und Realisierung*, 1:47–80.

- Obernberger et al. (2001). Biomasse-kraft-wärme-kopplung auf basis des orc-prozesses - eu-thermie-projekt admont (a). *Tagungsband zur VDI-Tagung Thermischer Nutzung fester Biomasse*, 1:1 – 20.
- Obernberger et al. (2002). Description and evaluation of the new 1,000 kwel organic rankine cycle process integrated in the biomass chp plant in lienz, austria. *Euroheat & Power*, 10:1 – 17.
- Pepperl+Fuchs GmbH (2007). Handbuch safety integrity level. [http://files.pepperl-fuchs.com/selector\\_files/navi/productInfo/doct/tdoct0713a\\_ger.pdf](http://files.pepperl-fuchs.com/selector_files/navi/productInfo/doct/tdoct0713a_ger.pdf). [Abgefragt am 30.12.2013].
- Rossing N.L. et al. (2009). A functional hazop methodology. *Computers and Chemical Engineering*, 34:244 – 253.
- Sasol Germany GmbH - Marlotherm (2002). *Marlotherm - News Letter No. 20; Chemical Structures and Thermal Stability of Organic Heat Transfer Fluids*. Sasol.
- Sasol Olefins & Surfactants GmbH (2013a). *schriftliche Mitteilung über die Lebensdauer von Marlotherm SH*. Sasol.
- Sasol Olefins & Surfactants GmbH (2013b). *unverbindliche Preis- und Lieferanfrage für Marlotherm SH*. Sasol.
- Solutia Europe S.A./N.V. (1998). Therminol 66 high performance, high stable, heat transfer fluid. <http://twf.mpei.ac.ru/TTHB/HEDH/HTF-66.PDF>. [Abgefragt am 23.10.2013].
- Solutia Inc. (2011). Therminol 66 material safety data sheet. <https://team.solutia.com/sites/msds/Therminol%20MSDS%20Documents/198WEN.pdf>. [Abgefragt am 22.10.2011].
- Turboden s.r.l. (s.a.). Das Problem der Kontamination von Silikonöl im Thermoöl: Erfahrungen, Laborproben, Forschungen für die Risiko-Minimierung und Kontrolle.
- van Loo, S. und Koppejan J. (2008). *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. Earthscan.
- Verein Deutscher Ingenieure (1995). Vdi 3033: Wärmeübertragungsanlagen mit organischen wärmeträgern: Betreiben, warten, instandsetzen.
- Wagner, I. (2005). *Wärmeträgertechnik mit organischen Fluiden*. Vogel Verlag und Druck.
- WTS - Wagner Technik Service (2013). Stoffdaten von wärmeträgerölen. [http://www.wts-online.de/wts-online/index.php?option=com\\_content&view=category&id=21&Itemid=94](http://www.wts-online.de/wts-online/index.php?option=com_content&view=category&id=21&Itemid=94). [Abgefragt am 28.10.2013].
- Zschetzsche, A. (2013). *mündliche Mitteilung über Rückschlagklappen*.



# Anhang

## Die HAZOP-Studientabelle

Abweichung	Ursache	Konsequenzen	Schutzvorrichtungen	zu prüfen (*), Empfehlung (●), offener Punkt (◇)	SIL
sehr wenig/kein Durchfluss von TÖ	<b>1. geschlossene Handventile</b>	Überhitzung von TÖ im Bereich Kessel; Verkockung des TÖ; möglicher Druckanstieg im System durch verdampfen; Bersten von Rohrleitungen; Austritt von TÖ im Kessel, außerhalb des Kessels bzw. im Rohrleitungssystem (Rohre sind auf 450 °C ausgelegt); Brandgefahr durch Kesselversagen; Gefahr von Verbrennungen durch austretendes TÖ; Gefahr der Entzündung von TÖ im Kesselhaus; <b>Klasse: C2, F1, P2, W2</b>	Durchflussüberwachung (FZA- 1.910); Hartverdrahtung; Sicherheitsventil; Notkühlung und automatische Ausschaltung der Feuerung durch FZA- 1.910 ausgelöst	★ Position Druckabsicherung (PZA+); ★ Abschaltung Kessel im Bezug auf CO-Bildung (Not-Stopp der Feuerung); ★ Ausfallsrisiko des FZA- 1.910; ★ Anfahrprozedur mit kaltem TÖ (Schutzabschaltung) (Hinweis: DIN 4754)	<b>SIL 1</b>
verringertes Durchfluss von TÖ (unter dem Minimum; Sicherheitskette wird ausgelöst)	<b>2. Verschmutzung, Verstopfung im Kesselbereich (Notkühlsystem ist nicht direkt wirksam)</b>	Überhitzung vom TÖ im Bereich Kessel; Verkockung des TÖ; möglicher Druckanstieg im System durch verdampfen; Bersten von Rohrleitungen; Austritt von TÖ im Kessel, außerhalb des Kessels bzw. im Rohrleitungssystem; Brandgefahr durch Kesselversagen; Gefahr von Verbrennungen durch austretendes TÖ; Gefahr der Entzündung von TÖ im Kesselhaus; kein plötzlicher Nulldurchfluss möglich <b>Klasse: C2, F1, P1, W2</b>	Durchflussüberwachung (FZA- 1.910); Hartverdrahtung; Sicherheitsventil; Notkühlung und automatische Ausschaltung der Feuerung durch FZA- 1.910 ausgelöst		<b>keine speziellen Sicherheitsanforderungen</b>

Abweichung	Ursache	Konsequenzen	Schutzvorrichtungen	zu prüfen (*), Empfehlung (●), offener Punkt (◇)	SIL
verringertes Durchfluss von TÖ (unter dem Minimum; Sicherheitskette wird ausgelöst)	<b>3. Verschmutzung, Verstopfung außerhalb des Kesselbereichs (Notkühlsystem ist wirksam)</b>	Überhitzung vom TÖ im Bereich Kessel; Verkokung des TÖ; möglicher Druckanstieg im System durch verdampfen; Bersten von Rohrleitungen; Austritt von TÖ im Kessel, außerhalb des Kessels bzw. im Rohrleitungssystem; Brandgefahr durch Kesselversagen; Gefahr von Verbrennungen durch austretendes TÖ; Gefahr der Entzündung von TÖ im Kesselhaus; <b>Klasse: C2, F1, P1, W2</b>	Durchflussüberwachung (FZA- 1.910); Hartverdrahtung; Sicherheitsventil; Notkühlung und automatische Ausschaltung der Feuerung durch FZA- 1.910 ausgelöst		<b>keine speziellen Sicherheitsanforderungen</b>
kein Durchfluss von TÖ	<b>4. Pumpenausfall</b>	Überhitzung vom TÖ im Bereich Kessel; Verkokung des TÖ; möglicher Druckanstieg im System durch verdampfen; Bersten von Rohrleitungen; Austritt von TÖ im Kessel, außerhalb des Kessels bzw. im Rohrleitungssystem; Brandgefahr durch Kesselversagen; Gefahr von Verbrennungen durch austretendes TÖ; Gefahr der Entzündung von TÖ im Kesselhaus; <b>Klasse: C2, F1, P2, W2</b>	Durchflussüberwachung (FZA- 1.910); Hartverdrahtung; Sicherheitsventil; Notkühlung und automatische Ausschaltung der Feuerung durch FZA- 1.910 ausgelöst; Redundanz der Pumpen (es läuft immer nur eine Pumpe, bei Ausfall der Pumpe springt die Zweite nicht an, weil Sicherheitskette und somit Notkühlung aktiviert wird)		<b>SIL 1</b>

Abweichung	Ursache	Konsequenzen	Schutzvorrichtungen	zu prüfen (*), Empfehlung (●), offener Punkt (◇)	SIL
weniger Durchfluss von TÖ	<b>5. Ölverlust</b>	Brandgefahr; unmittelbare Gefährdung von Personen; <b>Klasse: C2, F1, P2, W3</b>	Niveau vom Ausdehnungsgefäß (LZA- 6.2.2.150, ist harverdrahtet); regelmäßige Rundgänge und regelmäßige Wartung (LSA+ beispielsweise kontrollieren); Vermeidung von Flanschen; Abdichtungen am Ventil; gute Isolierung	● Leckageüberwachung im Bereich der Pumpen (Auffangwannen bei den Pumpen mit Temperaturfühler oder Druckmessgerät)	<b>SIL 1</b>
geringerer Durchfluss von TÖ (Durchfluss TÖ-Kessel ungleichverteilt)	<b>6. unterschiedlich starke Verschmutzung der beiden Rohrgänge im TÖ-Kessel</b>	unterschiedliche Temperaturen; Gefahr der Überhitzung; Verkokungen; Ausdampfungen von TÖ; Schädigung der Kesselrohre; Überschreitung der zulässigen Filmtemperatur; raschere Alterung des TÖ: 10 Grad weniger im TÖ-Vorlauf führt zu einer Verdoppelung der Lebensdauer; <b>Klasse: C2, F1, P1, W3</b>	Durchflussüberwachung für beide Rohrgänge (FZA-1.910)	● Vergleich des Differenzdrucks der beiden Rohrgänge	<b>SIL 1</b>
zu viel Durchfluss von TÖ	<b>7. beide Pumpen laufen</b>	höherer Durchfluss im Kreislauf; höherer Vordruck; geringere Temperaturspreizung im Kreis; Strömungsprobleme; höherer Stromverbrauch; <b>nicht sicherheitstechnisch relevant</b>	gegenseitige Verriegelung; nicht überbrückbar		

Abweichung	Ursache	Konsequenzen	Schutzvorrichtungen	zu prüfen (*), Empfehlung (●), offener Punkt (◇)	SIL
zu viel Durchfluss von TÖ	<b>8. Leckage auf der Druckseite der Pumpe</b>	Brandgefahr; unmittelbare Gefährdung von Personen; <b>Klasse: C2, F1, P2, W3</b>	Niveau vom Ausdehnungsgefäß (LZA- 6.2.2.150, ist hartverdrahtet); regelmäßige Rundgänge und regelmäßige Wartung (LSA+ beispielsweise kontrollieren); Vermeidung von Flanschen; Abdichtungen am Ventil; gute Isolierung	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Leckageüberwachung im Bereich der Pumpen (Auffangwanne bei den Pumpen mit Temperaturfühler oder Druckmessgerät)</li> </ul>	<b>SIL 1</b>
falscher Durchfluss von TÖ	<b>9. Durchfluss des TÖ verkehrt über den Notkühler (Versagen der Rückschlagklappe)</b>	geringerer TÖ-Kessel-Durchfluss; Durchflusswächter können ansprechen (FZA- 1.910); geringere Leistung durch Zurückregelung der Feuerung; Notkühler ist aktiv; <b>nicht sicherheitstechnisch relevant</b>	Durchflusswächter (FZA- 1.910)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Temperaturmessung im Notkühlkreislauf installieren;</li> <li>● regelmäßige Inspektionen der Rückschlagklappen</li> </ul>	
falscher Durchfluss von TÖ	<b>10. Versagen der Rückschlagklappe im Pumpenvorlauf bei Notkühlbetrieb</b>	reduzierte Kühlwirkung im Notkühlbetrieb; Verkokungen; zu geringer Durchfluss; die TÖ-Temperatur kann steigen, aber nicht dramatisch; <b>nicht sicherheitstechnisch relevant</b>			
zu hohe Temperatur (TÖ)	<b>11. zu geringer Durchfluss</b>	siehe Durchflussthema (Punkt 1 bis 6)			

Abweichung	Ursache	Konsequenzen	Schutzvorrichtungen	zu prüfen (★), Empfehlung (●), offener Punkt (◇)	SIL
zu hohe Temperatur (TÖ)	<b>12. zu große Feuerleistung oder zu geringe Energieabnahme</b>	Verkokungen; Ausdampfungen von TÖ; Schädigung der Kesselrohre; Überschreitung der zulässigen Filmtemperatur; rasche Alterung des TÖ: 10 Grad weniger im TÖ-Vorlauf führt zu einer Verdoppelung der Lebensdauer; <b>Klasse: C2, F1, P1, W3</b>	Ansprechen des Sicherheitstemperaturbegrenzers (STB) (TZA+ 1.900); Ansprechen der Notkühlung (immer wenn Sicherheitskette anspringt); mindestens jährliche Prüfung	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Kontrolle der Rauchgastemperatur im TÖ-Kessel;</li> <li>● Feuerungsleistungsregelung optimieren</li> </ul>	<b>SIL 1</b>
zu hohe Temperatur (TÖ)	<b>13. zu hohe Temperatur im Feuerraum</b>	Verkokungen; Ausdampfungen von TÖ; Schädigung der Kesselrohre; Überschreitung der zulässigen Filmtemperatur; raschere Alterung des TÖ: 10 Grad weniger im TÖ-Vorlauf führt zu einer Verdoppelung der Lebensdauer; <b>Klasse: C2, F1, P1, W3</b>	keine	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Kontrolle der Rauchgastemperatur im TÖ-Kessel</li> </ul>	<b>SIL 1</b>
zu hohe Temperatur (TÖ)	<b>14. keine Nachspeisung von Kühlwasser im Notkühlbetrieb</b>	keine Kühlung; Verkokungen; Ausdampfungen von TÖ; Schädigung der Kesselrohre; Überschreitung der zulässigen Filmtemperatur; raschere Alterung des TÖ: 10 Grad weniger im TÖ-Vorlauf führt zu einer Verdoppelung der Lebensdauer; <b>Klasse: C2, F1, P1, W2</b>	bei nicht vorhandener Wasserversorgung fährt der Kessel herunter; Vorlage reicht für ca. 20 Minuten Abfahrbetrieb; gesichertes Abfahren	★ Abfahrbetrieb über LZA-6.1.7.150 (Abfahren nicht über Notkühlbetrieb; stattdessen gesichertes Abfahren)	<b>keine speziellen Sicherheitsanforderungen</b>

Abweichung	Ursache	Konsequenzen	Schutzvorrichtungen	zu prüfen (*), Empfehlung (●), offener Punkt (◇)	SIL
zu hohe Temperatur (TÖ)	<b>15. fehlendes Kühlwasser für den Notkühlbetrieb</b>	keine Notkühlung möglich; Verkokungen; Ausdampfungen von TÖ; Schädigung der Kesselrohre; Überschreitung der zulässigen Filmtemperatur; raschere Alterung des TÖ: 10 Grad weniger im TÖ-Vorlauf führt zu einer Verdoppelung der Lebensdauer; Überhitzung im Notkühlbetrieb; <b>Klasse: C2, F1, P1, W2</b>	Niveauschalter (LZA-6.1.7.150); gesichertes Abfahren		<b>keine speziellen Sicherheitsanforderungen</b>
zu hohe Temperatur (TÖ)	<b>16. Einfrieren des Kühlwassers im Notkühler oder des Sicherheitswärmeübertragers</b>	<b>nicht sicherheitstechnisch relevant</b>	Aufstellung im beheizten Raum		
zu niedrige Temperatur (TÖ)	<b>17. verschmutzter Kessel</b>	schlechterer Wärmeübergang; Rauchgastemperatur sehr hoch nach dem TÖ-Kessel; <b>nicht sicherheitstechnisch relevant</b>	TZA+ 1.900; TZA+ 1.250	★ Kontrolle der Statik bezüglich maximaler Rauchgastemperatur	
zu niedrige Temperatur (TÖ)	<b>18. zu viel Wärmeabnahme</b>	<b>nicht sicherheitstechnisch relevant</b>			

Abweichung	Ursache	Konsequenzen	Schutzvorrichtungen	zu prüfen (★), Empfehlung (●), offener Punkt (◇)	SIL
zu hoher Druck (TÖ)	<b>19. Absperrung TÖ-Kessel und thermische Ausdehnung</b>	Überhitzung von TÖ im Bereich Kessel; Verkokung des TÖ; möglicher Druckanstieg im System durch verdampfen; Bersten vor Rohrleitungen; Austritt von TÖ im Kessel, außerhalb des Kessels bzw. im Rohrleitungssystem; Brandgefahr durch Kesselversagen; Gefahr von Verbrennungen durch austretendes TÖ; Gefahr der Entzündung von TÖ im Kesselhaus; <b>Klasse: C2, F1, P2, W2</b>	Durchflussüberwachung (FZA– 1.910); Hartverdrahtung; Sicherheitsventil; Notkühlung und automatische Ausschaltung der Feuerung durch FZA– 1.910 ausgelöst; PZA+ (aber Ort der Aufstellung?)	★ Position Druckabsicherung (PZA+); ★ Abschaltung Kessel im Bezug auf CO-Bildung (Not-Stopp); ★ Ausfallsrisiko des FZA– 1.910; ★ Anfahrprozedur mit kaltem TÖ (Schutzabschaltung; Deaktivierung der Sicherheitskette) (beachte DIN 4754)	<b>SIL 1</b>
hoher Druck (Ausdehnungsgefäß und Sammelgefäß)	<b>20. hohe Stickstoffmenge</b>	unzulässige Belastung der Behälter; Bersten der Behälter; <b>Klasse: C2, F1, P2, W2</b>	Sicherheitsventil $p_{\ddot{U}} = 0,5$ bar (für beide Behälter)		<b>SIL 1</b>
hoher Druck (Ausdehnungsgefäß)	<b>21. verstopfte Ausgleichsleitung</b>	unzulässige Belastung des Behälters; Bersten des Behälters; <b>Klasse: C2, F1, P2, W1</b>	ausreichende Dimensionierung der Ausgleichsleitung (momentan DN 65)	● lokales Manometer im Ausdehnungsgefäß einbauen	<b>keine speziellen Sicherheitsanforderungen</b>
niedriger Druck (vor der Pumpe - Saugseite)	<b>22. verstopfte Filter / Schmutzfänger</b>	geringerer Durchfluss; Strömungsprobleme; Kavitation (mechanische Beschädigung der Pumpen); Überhitzung im Kessel (durch geringen Durchlauf); erhöhter Stromverbrauch; <b>Klasse: C2, F1, P1, W2</b>	Durchflussüberwachung (FZA– 1.910); Hartverdrahtung; Sicherheitsventil; Notkühlung und automatische Ausschaltung der Feuerung durch FZA– 1.910 ausgelöst	● regelmäßiges Überprüfen bzw. Reinigen des Schmutzfilters	<b>keine speziellen Sicherheitsanforderungen</b>

Abweichung	Ursache	Konsequenzen	Schutzvorrichtungen	zu prüfen (*), Empfehlung (●), offener Punkt (◇)	SIL
niedriger Druck (im Ausdehnungsgefäß)	<b>23. verstopfte Ausgleichsleitung UND Abkühlen des Systems</b>	unzulässige Belastung des Behälters; Bersten des Behälters; <b>Klasse C1, F1, P2, W1</b>	ausreichende Dimensionierung der Ausgleichsleitung	● lokales Manometer im Ausdehnungsgefäß einbauen	<b>keine Sicherheitsanforderungen</b>
niedriger Druck (im Ausdehnungsgefäß und Sammelgefäß)	<b>24. Ausfall der Stickstoffversorgung UND Abkühlen des Systems</b>	unzulässige Belastung der Behälter; Bersten der Behälter; <b>Klasse: C1, F1, P2, W2</b>	Vakuumbrecher		<b>keine Sicherheitsanforderungen</b>
sowohl TÖ als auch das ORC-Medium	<b>25. Vermischung: ORC-Medium in den TÖ-Kreislauf</b>	Herabsetzung des Siedepunktes vom TÖ; Gasblasenbildung im TÖ-Kreis; lokale Kesselrohrüberhitzung mit TÖ-Austritt; Brand; Volumensvergrößerung; Kavitation (Strömungsabriss); <b>Klasse: C2, F1, P1, W2</b>	Entgaser im TÖ-Kreis; jährliche Probenahme; geeignete Kesselkonstruktion (für eine gleichmäßige und starke Durchströmung); Ausdehnungsgefäß (LSA+)	● häufigere Probenahme (als einmal pro Jahr) des TÖ ◇ dieser Punkt wurde nicht abschließend geklärt	<b>vorraussichtlich (da nicht abschließend geklärt) keine speziellen Sicherheitsanforderungen</b>
sowohl das ORC-Medium als auch TÖ	<b>26. Vermischung: TÖ in den ORC-Kreislauf</b>	Veränderung des ORC-Arbeitsmediums mit Leistungseinbußen; <b>nicht sicherheitstechnisch relevant</b>			
sowohl TÖ als auch Wasser	<b>27. Vermischung Wasser in den TÖ-Kreislauf (Notkühler); da der BWT ein Sicherheitsübertrager ist wird nur der Notkühler beachtet</b>	Herabsetzung des Siedepunktes vom TÖ; Gasblasenbildung im TÖ-Kreis; lokale Kesselrohrüberhitzung mit TÖ-Austritt; Brand; Volumensvergrößerung; Kavitation (Strömungsabriss); <b>Klasse C2, F1, P2, W1</b>	Entgaser im TÖ-Kreis; jährliche Probenahme; Sicherheitswärmeübertrager (XZA); geeignete Kesselkonstruktion (für eine gleichmäßige und starke Durchströmung); Ausdehnungsgefäß (LSA+)	● häufigere Probenahme des TÖ; ★ Funktion des XZA (führt anscheinend nicht zu einer Abschaltung)	<b>keine speziellen Sicherheitsanforderungen</b>

Abweichung	Ursache	Konsequenzen	Schutzvorrichtungen	zu prüfen (*), Empfehlung (●), offener Punkt (◇)	SIL
sowohl Wasser als auch TÖ	<b>28. Vermischung TÖ in das Wasser des Notkühlers; da der BWT ein Sicherheitswärmeübertrager ist wird nur der Notkühler betrachtet</b>	TÖ wird über die Abdampfeinrichtung mitgerissen und an die Umgebung abgegeben; umweltrelevant, jedoch <b>nicht sicherheitstechnisch relevant</b>	keine		
falsche Konzentration / Zusammensetzung (TÖ)	<b>29. veraltetes bzw. beschädigtes Thermoöl</b>	Herabsetzung des Siedepunktes vom TÖ; Gasblasenbildung im TÖ-Kreis; lokale Kesselrohrüberhitzung mit TÖ-Austritt; Brand; Volumensvergrößerung; Kavitation (Strömungsabriss); <b>Klasse: C2, F1, P1, W2</b>	Entgaser im TÖ-Kreis; jährliche Probenahme; geeignete Kesselkonstruktion (für eine gleichmäßige und starke Durchströmung)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• häufigere Probenahme / regelmäßige Überprüfung;</li> <li>• bei Bedarf auskochen</li> </ul>	<b>keine speziellen Sicherheitsanforderungen</b>
Viskosität	<b>30. Temperaturveränderungen im TÖ</b>	siehe Temperatur (siehe Punkt 11 bis 18)			
kein Strom	<b>31. Stromausfall</b>	Überhitzung von TÖ im Bereich Kessel; Verkokungen; möglicher Druckanstieg im System durch verdampfen; Bersten von Rohrleitungen; Austritt von TÖ im Kessel, außerhalb des Kessels bzw. im Rohrleitungssystem; Brandgefahr durch Kesselversagen; Gefahr von Verbrennungen durch austretendes TÖ; Gefahr der Entzündung von TÖ im Kesselhaus; <b>Klasse: C2, F1, P2, W2</b>	Notkühlsystem mit Dieselpumpe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• regelmäßiger Probetrieb der Dieselpumpe;</li> <li>• regelmäßiger Batteriewechsel</li> </ul>	<b>SIL 1</b>

---

## Schema Thermoölkreislauf