

Abschlussbericht zum Vorhaben

Signifikante Reduzierung des Schadstoffausstoßes bei Warmbehandlungsprozessanlagen durch Verstromung der weitgehend ungenutzten Prozessabwärme

KfW-Aktenkennzeichen NKa3 - 001977

Fördernehmer/-in	 BILSTEIN INDUSTRIEBETEILIGUNGEN KG Im Weinhof 36, D-58119 Hagen-Hohenlimburg
Umweltbereich	Klimaschutz
Laufzeit des Vorhabens	27.09.2012 – 31.12.2019
Autor	Christian Hagenkord, Anlagen- und Verfahrenstechnik, Projektleiter
Fertigstellung	31.07.2021

Gefördert durch



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und nukleare Sicherheit



Berichts-Kennblatt

Aktenzeichen UBA:	Vorhaben-Nr. Nka3 - 001977
Titel des Vorhabens Signifikante Reduzierung des Schadstoffausstoßes bei Warmbehandlungsprozessanlagen durch Verstromung der weitgehend ungenutzten Prozessabwärme	
Autoren (Namen, Vornamen) Hagenkord, Christian	Vorhabensbeginn: 27.09.2012
	Vorhabensende (Abschlussdatum): 31.12.2019
Fördernehmer / -in (Name, Anschrift) BILSTEIN INDUSTRIEBETEILIGUNGEN KG Im Weinhof 36, D-58119 Hagen-Hohenlimburg	Veröffentlichungsdatum: 31.07.2021
	Seitenzahl: 35 (ohne Berichts-Kennblatt, Verzeichnisse und Anhang)
Gefördert im Rahmen des Umweltinnovationsprogramms des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit	
Kurzfassung <p>Beim Umformen metallischer Werkstoffe durch Kaltwalzen wird das Metall stark verfestigt und seine Verformbarkeit nimmt ab (Kaltverfestigung). Um die zur Weiterverarbeitung erforderlichen metallurgischen Eigenschaften wiederherzustellen, wird der Werkstoff bis auf eine Temperatur von 500 - 800 °C erwärmt (Rekristallationsglühen). Die beim anschließenden Abkühlvorgang entweichende Wärme ging bisher ungenutzt verloren. BILSTEIN hat erstmalig in der metallverarbeitenden Industrie eine ORC-Anlage (Organic Rankine Cycle) errichtet, um die entweichende Wärme einer Haubenglühanlage für die Strom- und Wärmeerzeugung zu nutzen. Die Umsetzung des Vorhabens erfolgte mit Unterstützung der Unternehmen: Ascentec GmbH, LOI Thermprocess GmbH und DeVeTec GmbH.</p> <p>Das umgesetzte Verstromungskonzept entzieht dem in der Haubenglühanlage zirkulierenden Gasstrom die Wärme und überträgt diese mit Hilfe des Wärmetransportmediums Thermalöl auf das im ORC-Prozess verwendete Arbeitsmedium Ethanol. Das verdampfende Ethanol treibt dann anstelle der üblichen ORC-Turbine, einen ORC-Kolbenmotor an. Dabei wird thermische in mechanische Energie umgewandelt, die einen an den Kolbenmotor gekoppelten Generator antreibt, der schließlich die mechanische in elektrische Energie umwandelt.</p> <p>Der stufenlos regelbare Kolbenmotor der ORC-Anlage kommt mit diskontinuierlicher Wärmezufuhr aus, was ihn gegenüber einer üblicherweise eingesetzten Turbine auszeichnet und es ermöglicht auf einen Hochtemperatur-Wärmespeicher zu verzichten. Die eingesetzte Technik erschließt so die Nutzung von "Abfallwärme" auf einem Temperaturniveau zwischen 200 und 400 Grad Celsius. In der Regel wird dieses Wärmeniveau einfach ungenutzt an die Umwelt abgegeben. Mit der ORC-Anlage kann ein guter Wirkungsgrad von 10 Prozent bei Investitionskosten von rd. 2,9 Mio. Euro erzielt werden.</p> <p>Durch die technische Erweiterung der Haubenglühanlage um die ORC-Anlage konnte die Energieeffizienz der Haubenglühanlage um rund 16 % Prozent gesteigert werden. Pro Jahr können auf Basis einer ersten Quantifizierung der Vorhabensergebnisse bei Vollauslastung der Haubenglühanlage rund 764 MWh elektrischer Strom und rund 6.601 MWh Heizwärme eingespart und rund 1.639 t CO₂-Emissionen pro Jahr vermieden werden. Bei einer Energieeffizienz-orientierten Steuerung der Kühlphase lassen sich die Energieeffizienz und Reduzierung des CO₂-Ausstoßes nochmals signifikant steigern.</p> <p>BILSTEIN nutzt den selbst erzeugten Strom ausschließlich vor Ort direkt in der wärmeabgebenden Glühanlage. Die anfallende thermische Energie setzt das Unternehmen unter anderem zum Beheizen der Gebäude und Prozesse ein.</p>	
Schlagwörter Abwärmenutzung, Abwärmeverstromung, Organic Rankine Cycle (ORC), Klimaschutz	
Anzahl der gelieferten Berichte Papierform: 5 Elektronischer Datenträger: 1	Sonstige Medien https://youtu.be/nV6w1hnlcWM Veröffentlichung im Internet auf der Homepage: https://www.bilstein-gruppe.de

Report-Coversheet

Reference-No. UBA:	Project-No. Nka3 – 001977
Project title Significant reduction of pollutant emissions from heat treatment plants by converting the largely unused process waste heat into electricity	
Authors Christian Hagenkord	Start of project: September 9, 2012
	End of project: December 12, 2019
Funding recipient BILSTEIN INDUSTRIEBETEILIGUNGEN KG Im Weinhof 36, 58119 Hagen-Hohenlimburg Germany	Publication date: Juli 31, 2021
	No. of pages: 35
Funded by the Environmental Innovation Program of the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety	
<p>Summary</p> <p>During the forming of metallic materials by cold rolling, the metal is strongly strain-hardened, resulting in decreased formability (strain hardening). In order to restore the metallurgical properties required for further processing, the material must therefore be heated to a temperature of 500 - 800 °C (recrystallization annealing). Previously the heat that escapes during the subsequent cooling process, got lost unused within the conventional process. For the first time in the metalworking industry, BILSTEIN has implemented an ORC (Organic Rankine Cycle) unit to use the released heat from a bell-type annealing plant to generate electricity and heat. The ORC implementation was supported by the following companies: Ascentec GmbH, LOI Thermprocess GmbH and DeVeTec GmbH.</p> <p>The implemented power generation process extracts the heat from the gas flow circulating in the bell-type annealing system and transfers it to the working medium, ethanol, used in the ORC process via the heat transport medium, thermal oil. The evaporating ethanol drives an ORC piston engine afterwards instead of the usual ORC turbine. Thermal energy is thereby converted into mechanical energy, which drives a generator coupled to the piston engine, which finally converts the mechanical energy into electrical energy.</p> <p>The continuously adjustable piston engine of the ORC system can work with a discontinuous heat supply, unlike a turbine, which is normally used in this process. A high-temperature heat accumulator is therefore not required. The implemented technology enables the use of "waste heat" at a temperature level between 200 and 400 °C. Normally, this heat is simply released unused into the environment. With the ORC unit, however, an energy efficiency of 10 percent can be achieved through investment costs of around 2.9 million euros.</p> <p>The integration of the ORC system has increased the energy efficiency of the bell-type annealing plant by around 16 percent. Based on an initial quantification of the project results, around 764 MWh of electricity and around 6,601 MWh of heating energy can be saved per year through full capacity utilization of the bell-type annealing system. Furthermore around 1,639 tons of carbon dioxide emissions can be avoided annually. With energy efficiency-oriented control of the cooling phase, the energy efficiency and reduction of CO₂ emissions can be significantly increased again.</p> <p>BILSTEIN uses the self-generated electricity exclusively on site directly in the heat-emitting annealing system. The generated thermal energy is used i.a. to heat buildings other processes.</p>	
<p>Keywords waste heat utilization, waste heat conversion, Organic Rankine Cycle (ORC), climate protection</p>	

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Kurzbeschreibung des Unternehmens	1
1.2	Ausgangssituation	1
1.2.1	Stand der Technik der Branche, Verfahrensablauf, Anlagentechnik	1
1.2.2	Stand der Technik BILSTEIN	4
1.2.3	Problembeschreibung, Einsatzstoffe und Umweltauswirkungen	5
2	Vorhabenumsetzung	5
2.1	Ziel des Vorhabens	5
2.2	Darstellung der technischen Lösung (Auslegung und Leistungsdaten)	6
2.2.1	Wärmeübertragung	7
2.2.2	Kreisprozess (Energieumwandlung)	8
2.2.3	Speichersystem.....	8
2.3	Darstellung der Umsetzung des Vorhabens.....	8
2.3.1	Vorhabenumsetzung im Überblick	9
2.3.2	Detaillierte Vorhabenplanung Ausbaustufe I	10
2.3.3	Umsetzungsphase Ausbaustufe I.....	10
2.3.4	Erfolgskontrolle und Definition und Umsetzung Optimierungsmaßnahmen	13
2.3.5	Umsetzungsphase Ausbaustufe II.....	16
2.3.6	Hemmnisse bei der Umsetzung des Vorhabens	16
2.4	Behördliche Anforderungen (Genehmigungen).....	18
2.5	Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten	18
3	Ergebnisse	19
3.1	Bewertung der Vorhabendurchführung	19
3.2	Stoff-, Energie- und Umweltbilanz (Basis: Ergebnisse der Ausbaustufe I).....	21
3.2.1	SOLL- IST-Vergleich Energieeinsparung pro Charge	22
3.2.2	Hochgerechnete Energieeinsparungs-Effekte pro Jahr.....	27
3.3	Wirtschaftlichkeitsanalyse	28
3.4	Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren	30
4	Empfehlungen	31
4.1	Erfahrungen aus der Praxiseinführung.....	31
4.2	Modellcharakter (Verbreitung und weitere Anwendung des Verfahrens / der Anlage).....	31
4.3	Zusammenfassung.....	32
5	Veröffentlichungen zum Vorhaben	33
6	Literatur	35
7	Anhang (vertraulich)	36

Abbildungen

Abb. 1: Schematische Darstellung Kaltbandherstellung.....	2
Abb. 2: Schematische Darstellung einer konventionellen Haubenglühanlage ohne Wärmerückgewinnung (Quelle: LOI Thermprocess GmbH)	3
Abb. 3: LOI-Bypasskonzept mit synchroner Zusammenschaltung von Heiz- und Kühlhaube (Quelle: LOI Thermprocess GmbH)	4
Abb. 4: Schematische Darstellung der Verstromung von Prozessabwärme (Quelle: LOI Thermprocess GmbH).....	7
Abb. 5: Blockschaltbild des umgesetzten Verstromungsprozesses (Quelle: BILSTEIN)	7
Abb. 6: Thermalölfluss zwischen Thermalölhauptkreis (Sekundärkreis) und Sockelkreislauf (Primärkreis),.....	11
Abb. 7: Einbindung Thermalölsammeltank	12
Abb. 8: Sicherheitszaun zur sicheren Trennung zwischen Montagebereich und Automatikbereich.....	12
Abb. 9: Aufstellen, Montage und Einbindung des DeVeTec-Containers und des ASCENTEC-Containers und deren Verbindung	12
Abb. 10: Anlagentechnik ASCENTEC-Container (Wärmeübertragung von Thermalöl auf Ethanol)	13
Abb. 11: Anlagentechnik DeVeTec-Container (ORC-Kolbenmotor und Generator zur Entspannung des Ethanoldampfes)	13
Abb. 12: Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Abwärmeleistung	14
Abb. 13: Gleichzeitigkeitsfaktor Betrachtungszeitraum Juni 2018 (Quelle: BILSTEIN)	21
Abb. 14: Annahme des Wärmestroms in die Charge beim Heizen und Kühlen (Quelle: LOI Thermprocess GmbH) ..	22
Abb. 15: Haubenglühanlage - Sankey-Diagramm Energieflüsse und -verluste (SOLL)	23
Abb. 16: Haubenglühanlage - Sankey-Diagramm Energieflüsse und -verluste (IST)	26

Tabellen

Tab. 1: Wesentliche Arbeitsschritte des Vorhabens von der Planungsphase bis zur Inbetriebnahme (Überblick).....	10
Tab. 2: Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der auskoppelbaren Wärmeleistung	14
Tab. 3: Minderleistung im Vergleich zu vertraglich vereinbarten Richtwerten	15
Tab. 4: Erreichte Umweltentlastung pro Charge und pro Jahr (Stand Abschluss Ausbaustufe I inkl. Maßnahme I) ...	20
Tab. 5: Ausgangsthese – Linearer Wirkungsgrad	23
Tab. 6: SOLL-/IST-Vergleich – Gegenüberstellung wesentlicher Annahmen.....	25
Tab. 7: SOLL-/IST-Vergleich – Effekte pro Charge	26
Tab. 8: SOLL-/IST-Vergleich – Hochgerechnete Effekte auf 24-Sockel-Haubenglühanlage BILSTEIN.....	28
Tab. 9: SOLL-/IST-Vergleich – Hochgerechnete Effekte in Deutschland	28

1 Einleitung

1.1 Kurzbeschreibung des Unternehmens

Die BILSTEIN GROUP beschäftigt heute weltweit ca. 1.500 Mitarbeiter und ist mit einer durchschnittlichen jährlichen Produktion von mehr als 600.000 Tonnen Europas führendes Kaltwalzunternehmen. Das Produktspektrum umfasst „Kaltband für 1000 und 1 Anwendung“. BILSTEIN bietet Stähle in diversen Sorten und Güteklassen für unterschiedliche Verarbeitungsverfahren, wie Biegen, Stanzen, Ziehen, Strecken und Tiefziehen. Dazu zählen die klassischen Einsatzstähle sowie Vergütungs- und Federbandstähle und für besondere Anforderungen oder Einsatzumgebungen Sondersorten wie mikrolegierte Stähle, MnB-Stähle und ZE-Sorten.

Im Jahr 1911 wurde BILSTEIN, das heutige Stammhaus der BILSTEIN GROUP, in Hagen-Hohenlimburg als Familienunternehmen in einem ehemaligen Tanzsaal gegründet. Heute verfügt das Unternehmen am Standort Hagen-Hohenlimburg über 65.000 qm Produktionsfläche und beschäftigte 2020 ca. 700 Mitarbeiter. Bei BILSTEIN liegt eine Betriebsaufspaltung in die Besitzgesellschaft BILSTEIN INDUSTRIEBETEILIGUNGEN KG und die Betriebsgesellschaft BILSTEIN GmbH & Co.KG vor, die eine wirtschaftliche Einheit bilden. Als Investor hat die BILSTEIN INDUSTRIEBETEILIGUNGEN KG (im Folgenden BILSTEIN) das vorliegende Vorhaben durchgeführt.

1.2 Ausgangssituation

1.2.1 Stand der Technik der Branche, Verfahrensablauf, Anlagentechnik

Herstellung von Kaltband, Kaltwalzen

Walzen ist ein Verfahren, bei dem ein meist metallischer Werkstoff zwischen zwei oder mehreren rotierenden Werkzeugen umgeformt wird. Erfolgt die Umformung oberhalb der Rekristallisationstemperatur des Werkstoffs wird der Vorgang als Warmwalzen, unterhalb der Rekristallisationstemperatur als Kaltwalzen bezeichnet. Dementsprechend werden Walzerzeugnisse, deren Breite die Dicke um ein Vielfaches übertrifft, als Warm- bzw. Kaltband bezeichnet. Die Herstellung von dünnem Stahlblech erfolgt ausschließlich durch Kaltwalzen. Mit dem Ziel definierte Materialeigenschaften zu erreichen, wird die Dicke von Warmband durch weitere Kaltwalzvorgänge auf mindestens 8,0 mm reduziert, wobei die Volumenänderung hauptsächlich in Laufrichtung erfolgt. Durch weiteres Kaltwalzen werden Dicken von bis zu 0,09 mm hergestellt. Unabhängig von der Dicke wird Kaltband aktuell z. B. bei BILSTEIN in Breiten von mittlerweile bis zu 1.350 mm produziert und zu Rollen (Coil) aufgewickelt. Durch Warmwalzen ist es nicht möglich vergleichbare Banddicken und Materialeigenschaften wie durch Kaltwalzen zu erzielen. Kaltgewalztes Feinblech ist aufgrund seiner mechanisch technologischen Eigenschaften der ideale Werkstoff für die Massenproduktion und wird für Stanz- und Biegeteile sowie Tiefzieh- und Spezialtiefziehzwecke in den verschiedensten Branchen eingesetzt, wie beispielsweise Automotive, Zwei-Rad-Industrie, Maschinenbau, Eisen-, Blech- und Metallwarenindustrie, Feinmechanik, Elektrotechnik, Stahlbau, Verpackungsindustrie.

Bei der Herstellung von Kaltband werden verschiedene Prozessschritte durchlaufen in denen das Ausgangsmaterial schrittweise durch Walzen gestreckt und mit den geforderten mechanisch-technologischen Eigenschaften versehen wird.

Der für das Vorhaben relevante Prozessschritt ist das Rekristallisationsglühen oder einfach nur „Glühen“ genannt.

Beim **Vorwalzen** erfolgt das Umformen des metallischen Werkstoffs durch Walzen unterhalb der Rekristallisationstemperatur. Das Metallgefüge wird in der Verformungsrichtung gestreckt, die Festigkeit des Werkstoffs steigt an und gleichzeitig nimmt seine Verformbarkeit ab (Kaltverfestigung). Durch die Kaltverfestigung ist der Werkstoff für eine Weiterverarbeitung zu spröde und muss im Anschluss an das Vorwalzen **rekristallisierend gegläht** werden, um seine Umformbarkeit wiederherzustellen. Beim **Nachwalzen** erhält der Werkstoff die final gewünschten mechanischen und technologischen Eigenschaften.



Abb. 1: Schematische Darstellung Kaltbandherstellung

Beim Rekristallisationsglühen handelt es sich um eine Wärmebehandlung des Werkstoffs mit Erwärmen auf eine definierte Temperatur, dem Halten auf dem Temperaturniveau und Abkühlen des Werkstoffs (in der Gesamtheit bezeichnet als „Glühreise“). Die einzelnen Abschnitte einer Glühreise erfolgen jeweils innerhalb definierter Zeitfenster. Die konkrete Ausgestaltung einer Glühreise ist abhängig von dem zu bearbeitenden Werkstoff und den kundenspezifisch vorgegebenen Anforderungen an die Umformbarkeit des Kaltbands.

Die Erwärmung erfolgt in modernen Anlagen durch erzwungene Konvektion mit einem um den Werkstoff herumgeführten Wasserstoff-Gasstrom. Gleiches gilt für die Abkühlung.

Industriell kommen für das Rekristallisationsglühen zwei verschiedene Verfahren zur Anwendung, die hinsichtlich ihrer Zeit- und Temperaturzyklen erhebliche Unterschiede aufweisen:

In der **Kontiglühe** wird das Stahlband vom Coil abgewickelt und kontinuierlich bei Temperaturen zwischen 700° C und 850° C durch einen langen Vertikalofen gezogen. Die Verweildauer auf Temperatur beträgt maximal 3 Minuten, die Abkühlung auf Raumtemperatur erfolgt ebenfalls kurzfristig. Der gesamte Glühvorgang, einschließlich Abkühlung auf Raumtemperatur (Glühreise), erfolgt innerhalb von 30 Minuten. Höherfeste Stahlsorten können nur im Durchlaufofen erzeugt werden.

In der **Haubenglühe** werden mehrere Coils übereinandergestapelt und bei Temperaturen zwischen 500° C und 800° C unter einer Schutzhaube (geschlossener Ofen) unter Schutzgasatmosphäre gegläht. Die Glühreise kann bis zu 5 Tage und mehr dauern. Aufgrund seiner Charakteristik als langsamer, gleichgewichtsnaher thermischer Wärmebehandlungsvorgang eignet sich das Haubenglühen insbesondere für die Herstellung von weichen, gut umformbaren Stählen (Tiefziehstähle).

Das Haubenglühen weist eine hohe Flexibilität sowohl hinsichtlich der Belegungsmöglichkeiten als auch der Skalierbarkeit der Produktionskapazitäten auf.

Eine Haubenglühe besteht aus Glühsockeln und beweglichen Heiz-, Schutz- und Kühlhauben. Auf den Sockeln werden abwechselnd Coils und gerippte Abstandsplatten (Konvektorscheiben) gestapelt. Über den Coilstapel wird eine am Sockel abgedichtete Schutzhaube gestülpt, darüber die Heizhaube. Die gestapelten Coils werden unter der geschlossenen Heizhaube bei Temperaturen zwischen 500° C und 800° C unter Schutzgasatmosphäre (z. B. H₂) gegläht, um die aufwendig erzeugte blanke und glatte Oberfläche des Kaltbands nicht zu zerstören und den Wärmeübergang zu verbessern. Die Konvektorscheiben ermöglichen die Umwälzung des Schutzgases zwischen den Stirnseiten der

Coils. Nach Ablauf der vorgesehenen Glühdauer wird die Heizhaube mit einer Kühlhaube getauscht und die Coils werden ebenfalls unter Schutzgasatmosphäre kontrolliert abgekühlt.

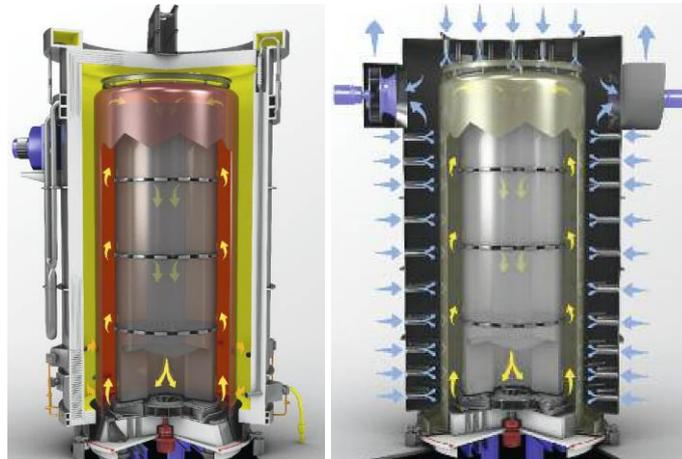


Abb. 2: Schematische Darstellung einer konventionellen Haubenglühanlage ohne Wärmerückgewinnung (Quelle: LOI Thermoprocess GmbH)

Abwärmenutzung

Die Deutsche Energie-Agentur (DENA) beziffert den Energieeinsatz der Industrieunternehmen für die Erzeugung von Prozesswärme mit jährlich 460 TWh bei einem jährlichen Einsparungspotential von mindestens 125 TWh im Prozesstemperaturbereich ab 60° C. Ein großer Anteil geht dabei ungenutzt als Abwärme verloren¹.

Zum Zeitpunkt der Antragstellung entsprach es dem Stand der Technik die dem Kaltband beim Abkühlvorgang entzogene Wärme meist nicht im Wärmebehandlungsprozess zu nutzen. Sie entwich über das Kühlwasser / die Luftkühlung. Unter Effizienzaspekten wäre grundsätzlich eine Rückführung der Abwärme als Wärme in den Prozess anzustreben. Die Realisierbarkeit der Nutzung von Prozessabwärme ist insbesondere vom Temperaturniveau der Abwärme und den spezifischen Prozessanforderungen abhängig sowie der zeitlichen Synchronisation von Abwärmeeinfall und Wärmebedarf. Die LOI Thermoprocess GmbH (Essen) verfolgt ein spezielles Bypass-Konzept zur partiellen Abwärmenutzung und Rückführung als Prozesswärme in den Glühprozess. Dabei wird die Verlustwärme, die beim Kühlvorgang entsteht und in konventionellen Anlagen ungenutzt bleibt, über einen Wärmetauscher für den Anwärmprozess in der Heizhaube genutzt.

¹ Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), „Erfolgreiche Abwärmenutzung in Unternehmen. Energieeffizienzpotentiale erkennen und erschließen.“, Stand 12/2015

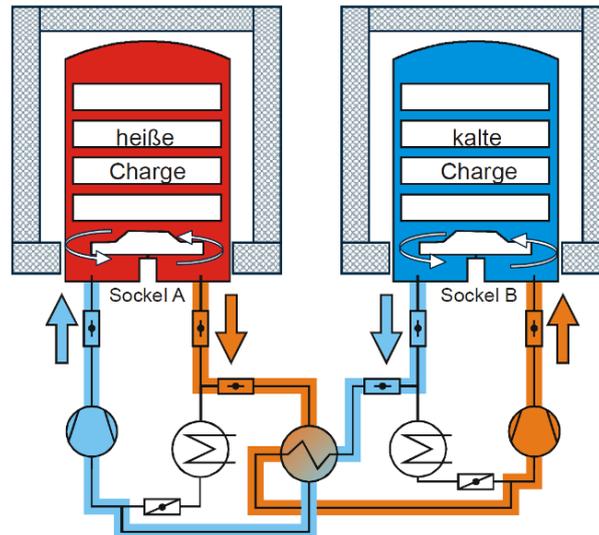


Abb. 3: LOI-Bypasskonzept mit synchroner Zusammenschaltung von Heiz- und Kühlhaube
(Quelle: LOI Thermprocess GmbH)

Dieses Verfahren setzt jedoch voraus, dass paarweise jeweils zwei Sockel synchron, eine Heiz- und eine Kühlhaube, zusammenschaltet werden können.

Alternativ wäre eine Einspeisung der industriellen Abwärme in ein Nahwärmenetz möglich gewesen. Diese Möglichkeit wird aber im Wesentlichen von der Verfügbarkeit eines entsprechenden Netzes, dem saisonal schwankenden Wärmebedarf und der zeitlichen Diskontinuität der Prozessabwärme determiniert.

Beide Ansätze zur Abwärmenutzung (LOI-Bypass-Konzept mit synchroner Zusammenschaltung von Heiz- und Kühlhaube oder Einspeisung in ein Wärmenetz) wurden jedoch u. a. wegen der Abhängigkeiten zwischen einzelnen Sockelpaaren und des zu niedrigen Temperaturniveaus aus wirtschaftlichen Gründen bis dato als nicht zielführend betrachtet. Diese Einschätzung deckt sich mit dem Forschungsbericht BWPLUS „EVA Thermische Energiespeicher zur Verstromung diskontinuierlicher Abwärme“ (Juli 2010) in dem ausgeführt wird, dass die Nutzung der Abwärme in ihrer effizientesten Form als Wärme häufig scheitert, da die Temperatur für den Produktionsprozess nicht ausreichend hoch ist und die Einspeisung in ein öffentliches Nahwärmenetz insbesondere wegen des zeitlich nicht bedarfsgerechten Anfalls der Abwärme unwirtschaftlich ist (z. B. gemäß AGFW (2015) 2 %-Anteil der industriellen Abwärme an der öffentlichen Fernwärme in 2014²).

1.2.2 Stand der Technik BILSTEIN

Zum Zeitpunkt des Vorhabenbeginns befand sich bei BILSTEIN am Standort in Hagen-Hohenlimburg eine 12 Sockel umfassende neue Haubenglühanlage im Aufbau. Eine weitere Ausbaustufe mit weiteren 12 Sockeln sollte sich im Zuge der Umsetzung eines neuen Walzkonzepts 2014 anschließen. Die neue 24-Sockel-Haubenglühe sollte auf eine maximale Jahreskapazität von 509.000 t (= 5.730 Chargen à durchschnittlich 88,8 t) bei Vollauslastung ausgelegt sein.

Dem Stand der Technik entsprechend, entwich die Prozessabwärme aus technischen und wirtschaftlichen Gründen weitestgehend ungenutzt.

² Der AGFW (Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.) führt jedes Jahr Erhebungen zur Struktur der Fernwärmeversorgung durch. Die Meldung der Versorgungsunternehmen ist freiwillig und variiert daher von Jahr zu Jahr, erfasst aber den Großteil der bereit gestellten Fernwärme.

1.2.3 Problembeschreibung, Einsatzstoffe und Umweltauswirkungen

Im Hinblick auf die Verminderung der Belastungen aus dem Haubenglühprozess war BILSTEIN durch den vorliegenden Stand der Technik eingeschränkt. Die Abkühlphase verlief in den beiden Teilphasen „Langsamkühlung“ und „Schnellkühlung“, wobei in der Langsamkühlung die Regeltemperatur von 700° C auf unter 500 ° C reduziert und in der Schnellkühlung weiter auf unter 100° C reduziert wurde. Für die Wärmerückgewinnung kam im Wesentlichen die Erwärmung von Kühlwasser in Frage. Aus Sicherheitsgründen konnte, analog dem Stand der Technik, eine Kühlung mit Wasser und die Gewinnung von Warmwasser für Heizanwendungen nur in der Teilphase Schnellkühlung erfolgen, war aber aufgrund der maximal erreichbaren Wassertemperatur des Kühlwassers von rd. 50° C üblicherweise nicht wirtschaftlich nutzbar.

Die unmittelbare Prozessrückführung der Abfallwärme (entsprechend dem LOI-Bypass-Konzept, siehe Abbildung 3, oben) ließ bei BILSTEIN keine effizienzoptimierte Nutzung der Abwärme erwarten und wäre zusätzlich mit einem Verlust an Produktionsflexibilität verbunden. Dies lag in der nur begrenzt zur Verfügung stehenden Prozessabwärme im Hochtemperaturbereich von 600° C bis 700° C, unterschiedlichen Abwärme- und Wärmebedarfszyklen und einem diskontinuierlichen Wärmeeinfall begründet. Die für den Wärmetausch erforderliche Temperaturdifferenz erlaubt eine Nutzung der Abfallwärme im direkten Tausch nur bis zu einer Aufheizung der kalten Stapel auf ca. 200° C bis 250° C. Eine weitere Tauschphase wäre mit dem exponentiell verlaufenden Zeitbedarf extrem unwirtschaftlich gewesen.

Mit jeder produzierten Charge ist ein Energieeinsatz von ca. 14.740,8 kWh_{thermisch} verbunden. Dies entspricht einem CO₂-Ausstoß von 2.963 kg. Bezogen auf die geplante 24-Sockel-Haubenglühe mit einer maximalen Jahreskapazität von rd. 509.000 t (= 5.730 Chargen à durchschnittlich 88,8 t) hätte dies bei Volllauslastung einen Energieeinsatz in Form von Erdgas von jährlich rd. 84.465 MWh_{thermisch} und einen jährlichen CO₂-Ausstoß rd. 16.977 t zur Folge.

2 Vorhabenumsetzung

2.1 Ziel des Vorhabens

Ziel des Vorhabens war die Nutzbarmachung bisher weitestgehend ungenutzt entweichender Prozessabwärme durch deren Verstromung und eine damit einhergehende Steigerung der Energieeffizienz und Reduzierung des CO₂-Ausstosses von Haubenglühanlagen.

Das in den Produktionsprozess integrierte Verstromungsmodul umfasst moderne umwelttechnologische Komponenten, die die anfallende Prozessabwärme technisch und wirtschaftlich optimal in elektrische Energie umwandeln. Das Vorhaben sollte gegenüber dem zugrundeliegenden Stand der Technik für Haubenglühanlagen eine Entlastung der Umwelt bei gleichzeitiger Verbesserung des Energieeinsatzes ermöglichen. Die Energieeffizienz des Haubenglühverfahrens sollte signifikant erhöht und damit verbundene Schadstoffemissionen vermieden werden.

Ein weiterer, zum Zeitpunkt der Antragstellung nicht quantifizierbarer Vorteil wurde in der, aufgrund des Abwärmeverstromungskonzeptes erwarteten besseren Regelbarkeit des Abkühlprozesses, im oberen Temperaturbereich ($> 500^{\circ}\text{C}$) gesehen. Es wurden folgende Effekte erwartet:

- Reduzierung von Klebern
- Reduzierung von Ausschuss
- Erhöhung der Qualität

Zum Zeitpunkt der Antragstellung waren jährlich ca. 2.000 t Ausschuss auf Kleber zurückzuführen. Mangels Erfahrungswerte ließ sich über eine Reduzierung der Ausschussquote keine valide Aussage treffen.

Die technische Lösung von BILSTEIN sollte den Stand der Technik überschreiten und innovativ sein hinsichtlich folgender Aspekte:

- Die technische und wirtschaftlich darstellbare Verstromung der Prozessabwärme im ORC-Prozess war per se innovativ, weil ein derartiges Gesamtkonzept von den Herstellern von Wärmebehandlungsanlagen bis dato nicht verfolgt und nicht für wirtschaftlich zweckmäßig gehalten wurde.
- Das von BILSTEIN verfolgte Verstromungskonzept sollte ohne Zwischenspeicher zur kontinuierlichen Energiebereitstellung auskommen. Die sich aus dem diskontinuierlichen Betrieb der Haubenglühanlage ergebenden Schwankungen der Energiebereitstellung sollten von der Kolbenmaschine des ORC-Prozesses aufgrund deren stufenloser Regelbarkeit problemlos bewältigt werden können. Im Gegensatz dazu wäre beim Dampfturbinenprozess ein Hochtemperaturspeicher zwingend erforderlich.
- Der gewählte Weg zur Prozesswärmerückgewinnung sollte unabhängig vom eigentlichem Glüh- oder Abkühlprozess sein und somit ideal an diesen anpassbar sein – konkurrierende Ziele zwischen Energieausbeute und Produktivität konnten so ausgeschlossen werden.
- Der Prozess der Wärmeverstromung mittels ORC-Technologie sollte problemlos um weitere Quellen der „Abfallenergie“ erweiterbar sein – beispielsweise um den Bau eines Moduls zur Kraft-Wärme-Kopplung (BHKW), um den Prozess auf ein höheres Niveau eines wirtschaftlich sinnvollen Wirkungsgrades anzuheben.
- Gegenüber dem konventionellen Glühen sollte die Verstromung die Energieeffizienz erhöhen und so zu einer Reduzierung des CO_2 -Ausstosses führen.

Pro Charge sollten vom Gesamtenergieeinsatz in Höhe von $14.740,8 \text{ kWh}_{\text{thermisch}}$ $6.683 \text{ kWh}_{\text{thermisch}}$ für eine Abwärmenutzung auskoppelbar sein. $2.800 \text{ kWh}_{\text{thermisch}}$ davon für die Abwärmeverstromung, die restlichen $3.883 \text{ kWh}_{\text{thermisch}}$ für Heiz- und Kühlzwecke.

2.2 Darstellung der technischen Lösung (Auslegung und Leistungsdaten)

Konkret wurde die Verstromung von Prozessabwärme entsprechend dem nachfolgenden Schaubild umgesetzt. Die Darstellung verdeutlicht die Aufteilung in die Teilphasen Langsamkühlung und Schnellkühlung, in denen Wärmeenergie bereitgestellt wird. Konnte dem Stand der Technik entsprechend bis dato nur die in der Schnellkühlung zur Verfügung stehende Wärmeenergie zurückgewonnen werden (z. B. zur Erwärmung von Wasser für Heizanwendungen), kann nun auch die bei der Langsamkühlung bisher ungenutzt entweichende Prozessabwärme zur Umwandlung in Strom genutzt werden. Durch die Erwärmung des im ORC-Prozess benötigten Kühlwassers auf rd. 75°C steht zusätzliche Wärmeenergie für Heizzwecke (z. B. Emulsionen, Hochregallager, Hallen) zur Verfügung.

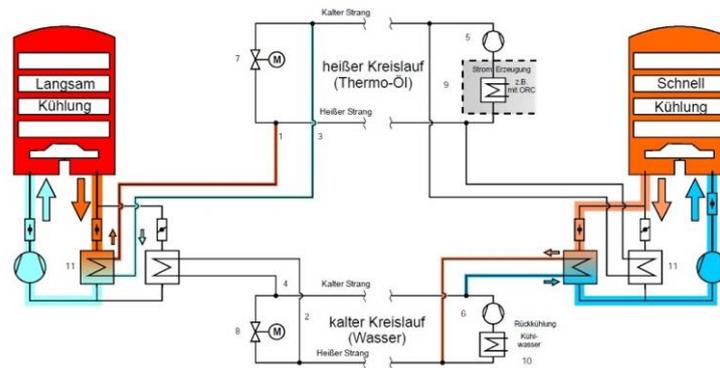


Abb. 4: Schematische Darstellung der Verstromung von Prozessabwärme (Quelle: LOI Thermprocess GmbH)

Zur Verstromung der Prozesswärme kommen grundsätzlich thermische Kreisprozesse in Frage, wie z. B. Wasserdampfturbinenprozesse oder Organic Rankine Cycle-Prozesse (ORC-Prozesse). BILSTEIN hat im Rahmen des Vorhabens einen ORC-Prozess umgesetzt (Erläuterung siehe 2.2.2). Die nachfolgende Abbildung zeigt das Blockschaltbild des umgesetzten Verstromungsprozesses. Eine größere und detailliertere Darstellung findet sich im Anhang 1.

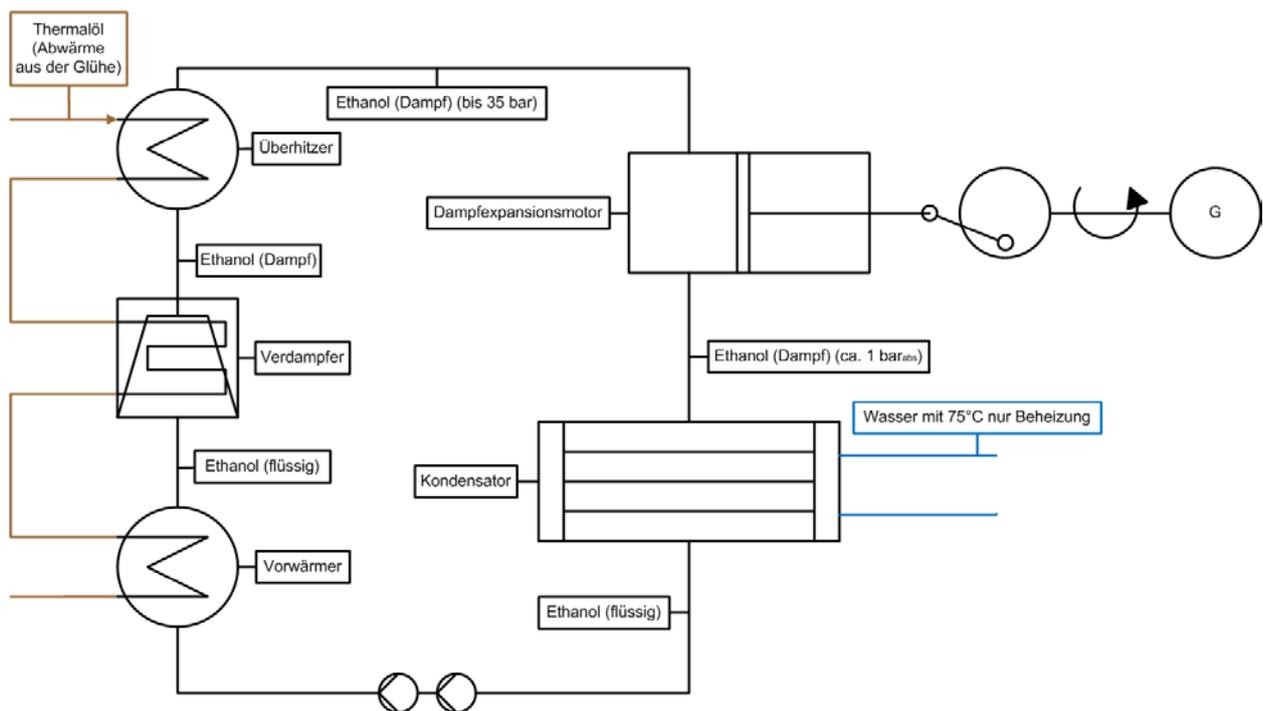


Abb. 5: Blendschaltbild des umgesetzten Verstromungsprozesses (Quelle: BILSTEIN)

Im Einzelnen umfasst die umgesetzte technische Lösung folgende Aspekte:

2.2.1 Wärmeübertragung

Die Abwärme des zu kühlenden Stapels von Stahlcoils mit einer Temperatur von rd. 755° C wird durch das in der Schutzhaube zirkulierende Schutzgas (Temperatur ebenfalls bis ca. 700° C) auf Thermalöl als Wärmetransportmedium übertragen. Das Thermalöl wird auf ein Temperaturniveau von mehr als 200° C gehoben. Bei den Wärmeübertragern zur Aufnahme der Prozessabwärme kann prinzipiell auf den bewährten Stand der Technik

zurückgegriffen werden. Wasser scheidet bei BILSTEIN jedoch als Wärmetransportmedium aus, da bei Temperaturen von über 200° C die Wärmetransportanlagen mit Druck beaufschlagt werden müssten und zur Aufrechterhaltung der Betriebssicherheit aufwendige Überwachungseinrichtungen erforderlich wären. Thermalöl hingegen weist ein übliches Einsatzspektrum im Temperaturbereich von 200° C bis 400° C auf. Die Wärmetransportanlage kann bis 350° C drucklos betrieben werden.

2.2.2 Kreisprozess (Energieumwandlung)

Für die Umwandlung der thermischen Energie in mechanische Energie zur Stromerzeugung kommen wie bereits beschrieben grundsätzlich Wasserdampfturbinenprozesse oder ein Organic Rankine Cycle-Prozess (ORC-Prozess) in Frage. Bei dem von BILSTEIN umgesetzten ORC-Prozess wird ein Kolbenmotor (Expander) anstatt mit Wasserdampf mit dem Dampf von organischen Flüssigkeiten betrieben.

Der Dampf der organischen Flüssigkeiten weist aufgrund der niedrigen Verdampfungstemperaturen dann Vorteile auf, wenn das zur Verfügung stehende Temperaturgefälle zwischen Wärmequelle und Wärmesenke zu niedrig für den Betrieb einer Wasserdampfturbine ist. Während der ORC-Prozess Vorteile bei niedrigen Temperaturen und Leistungen bietet, ist der Wasserdampfturbinenprozess bei Temperaturen oberhalb von 300° C und für elektrische Leistungen über 1 MW besonders vorteilhaft.

Die bei BILSTEIN vorliegenden starken Schwankungen der Abwärmeleistung sprechen ebenfalls für den Kolbenmotor. Gegenüber dem Dampfturbinenprozess können unterschiedliche Betriebspunkte des Verstromungsprozesses mit geringeren Wirkungsgradverlusten dargestellt werden. Als Arbeitsmedium wird bei BILSTEIN Ethanol eingesetzt.

Dem ORC-Prozess wird warmes Thermalöl zugeführt. Dessen Wärmeenergie wird auf das Arbeitsmedium Ethanol übertragen, das durch den Energieeintrag vollständig verdampft. Der Arbeitsmitteldampf wird in dem ORC-Kolbenmotor auf einen niedrigeren Druck entspannt, treibt ihn dadurch an und wandelt die thermische Energie in mechanische Energie um, die wiederum einen an den ORC-Kolbenmotor gekoppelten Generator antreibt und die mechanische in elektrische Energie umwandelt. Das Thermalöl kühlt bei der Wärmeübertragung auf das Arbeitsmedium Ethanol (Verdampfungsprozess) auf unter 200 °C ab, wird an Wasserstoff-Thermoöl-Wärmetauschern der Glühsockel wieder erhitzt, bevor es erneut dem ORC-Prozess zugeführt wird.

2.2.3 Speichersystem

In dem von BILSTEIN umgesetzten Verstromungskonzept wird kein Zwischenspeicher zur kontinuierlichen Energiebereitstellung eingesetzt. Die aus dem diskontinuierlichen Betrieb der Haubenglühanlage ergebenden Schwankungen der Energiebereitstellung können von der Kolbenmaschine des ORC-Prozesses problemlos bewältigt werden, da diese stufenlos regelbar ist. Bis jetzt konnte nicht festgestellt werden, dass die Schwankungen so groß werden, dass das System um einen thermischen Hochtemperatur-Wärmespeicher mit Thermalöl erweitert werden müsste. Dieses wäre jedoch technisch möglich.

2.3 Darstellung der Umsetzung des Vorhabens

Das Vorhaben wurde in zwei Teilvorhaben untergliedert, eine erste und eine zweite Ausbaustufe. Diese standen jeweils im engen Zusammenhang mit dem Ausbau der Haubenglühanlage.

2.3.1 Vorhabenumsetzung im Überblick

Im Folgenden wird der zeitliche Ablauf der Umsetzung des Vorhabens im Überblick dargestellt.

Vorhabenbeginn	27.09.2012	Genehmigung des förderunschädlichen vorzeitigen Vorhabenbeginns
Detaillierte Vorhabenplanung	Q4/2012 – Q1/2013	<ul style="list-style-type: none"> – Detaillierte Anlagen- und Zeitplanung der Lieferantentätigkeiten – Auslösen der Bestellungen
Umsetzungsphase Ausbaustufe I	Q4/2012 – Q1/2013	– Installation je einer Wärmetauschereinheit unter je einem der 12 Sockel
	Q3/2013	<ul style="list-style-type: none"> – Installation von 6 Sockelkreisläufen (Primärkreisläufe) – Installation des Thermalölhauptkreises zur Anbindung der 6 installierten Sockelkreisläufe
	Q4/2013	– Umsetzung Brandschutz- und Sicherheitskonzept (Fundament für hallenexterne Installation des ORC-Moduls, Schutzzaun)
	Q1 und Q2/2014	– Einbindung Thermalölsammeltank
	Q3/2014	<ul style="list-style-type: none"> – Installation weiterer 6 Sockelkreisläufe (Primärkreisläufe) – Installation des Thermalölhauptkreises zur vollständigen Anbindung aller 12 installierten Sockelkreise – Aufstellen, Montage und Einbindung des DeVeTec-Containers (für ORC-Kolbenmotor und Generator zur Entspannung des Ethanolampfes) im Einzelnen: <ul style="list-style-type: none"> – V12-ORC-Kolbenmotor – Generator – Steuerung für den Thermalölkreislauf – Steuerung für den Ethanolkreislauf
	Q4/2014	<ul style="list-style-type: none"> – Aufstellen, Montage und Einbindung des ASCENTEC-Containers (für Wärmeübertragung von Thermalöl auf Ethanol) im Einzelnen: <ul style="list-style-type: none"> – Vorwärmer – Verdampfer – Überhitzer – Kondensator – Pumpengruppe für den Thermalölkreislauf – Ausdehnungsgefäß für den Thermalölkreislauf – Pumpengruppe für den Ethanolkreislauf – Abschließende Montage und Verbindung der beiden Container – Vorbereitung und Inbetriebnahme des Gesamtsystems aus Thermalölkreislauf und Verstromungsmodul
	Q1/2015	<ul style="list-style-type: none"> – Beseitigung technischer Mängel hinsichtlich der automatischen Regelung der Ethanolpumpe, des ORC-Bypassventils und des Kühlwasserventils – Technische Abnahme des Thermalöl- und Ethanolkreislaufes
	Q2/2015	<ul style="list-style-type: none"> – Fehler in der Sicherheitskette (sicherheitskritischer Vorfall) – Stilllegung der ORC-Anlage (nur Testbetrieb unter konstanter Überwachung)
	Q2 bis Q4/2015	– Erweiterung der ORC-Anlage um vier weitere Sockelkreisläufe (Primärkreisläufe) parallel zur Erweiterung der Haubenglühanlage um weitere vier Sockel

		<ul style="list-style-type: none"> – Fehlerbeseitigung und sicherheitstechnische Abnahme – Übergang in den Regelbetrieb (bei reduzierter Drehzahl 750 U/min)
	Q4/2015	– Einlaufphase des ORC-Kolbenmotors (2.000 Std.) bei 750 U/min.
	Q1 bis Q3/2016	<ul style="list-style-type: none"> – Mängelbeseitigung durch Lieferanten – Analyse Leistungsabweichung der ORC-Anlage und Erarbeitung von Lösungsansätzen – Abnahme der ORC-Anlage
Definition und Umsetzung Optimierungsmaßnahmen	Q3/2016 – Q3/2017	<ul style="list-style-type: none"> – Maßnahme I: Leistungserhöhung der Wärmeauskopplung aus den Sockeln – Maßnahme II: Variable Drehzahlregelung des ORC-Kolbenmotors
Zwischenbericht zum Abschluss der Ausbaustufe I	17.11.2017	Abgabe Zwischenbericht zur Darstellung der Ergebnisse der Projektphase I <ul style="list-style-type: none"> – Ergebnisdarstellung und -bewertung – Einschätzung bzgl. der Erreichung des Gesamtziels des Vorhabens
Umsetzungsphase Ausbaustufe II	Q2 und Q3 2018	<ul style="list-style-type: none"> – Erweiterung der Haubenglühanlage von 16 auf 24 Sockel als Voraussetzung für die Erweiterung der ORC-Anlage – Vorbereitung der Erweiterung der ORC-Anlage auf weitere acht Sockel
	Q3/2018 – Q1/2019	<ul style="list-style-type: none"> – Erweiterung der ORC-Anlage um verbleibende acht Sockelkreisläufe (Primärkreisläufe) – Erweiterung Thermalölkreislauf (Sekundärkreislauf) für die Anbindung der acht installierten Sockelkreise – Inbetriebnahme der acht neuen Sockelkreise – Abarbeitung Restmängel an der Glühanlage (LOI) – Testphase neue Thermalöl-Ventilstände – Abnahme Ausbaustufe II
Vorhabenende	31.12.2019	Vorhabensende

Tab. 1: Wesentliche Arbeitsschritte des Vorhabens von der Planungsphase bis zur Inbetriebnahme (Überblick)

2.3.2 Detaillierte Vorhabenplanung Ausbaustufe I

Die Implementierung und Montage wesentlicher Anlagenbestandteile, insbesondere der Sockelkreisläufe und des Thermalölkreislaufes, konnte nicht während des laufenden Automatikbetriebs der Haubenglühanlage erfolgen, da die Anlage dann aus Sicherheitsgründen nicht zugänglich ist. Die Planung des Vorhabens musste, an diese Erfordernisse angepasst, an den Wartungsintervallen und Betriebsunterbrechungsphasen orientiert werden und flexibel anpassbar sein. Reparaturarbeiten musste Vorrang eingeräumt werden, da sie eine Voraussetzung für die reibungslose Produktion sind. Zu Beginn des Vorhabens wurde dementsprechend eine Sollplanung erstellt, die regelmäßig der veränderten Situation angepasst wurde.

2.3.3 Umsetzungsphase Ausbaustufe I

Unter Berücksichtigung der betrieblichen Erfordernisse erfolgte die Installation der ORC-Anlage schließlich dreigeteilt. Die ersten Sockelkreisläufe und der erste Teil des Thermalölkreislaufs zur Anbindung der sechs Sockelkreisläufe wurden in Q3/2013 installiert, weitere sechs Sockelkreisläufe und der zweite Teil des Thermalölkreislaufs in Q3/2014. In Q3 und Q4/2014 wurden in der Folge, ebenfalls nach Verzögerungen, DeVTec- und der ASCENTEC-Container aufgestellt, montiert, ver- und eingebunden.

Die Erweiterung auf vier weitere Sockelkreise erfolgte aus Wirtschaftlichkeitsgründen parallel zur Erweiterung der Haubenglühanlage um weitere vier Sockel in Q3/2015. Die folgenden Abbildungen 6 bis 11 dokumentieren die installierten Anlagenkomponenten und die erforderliche Peripherie.

Die Abbildung 6 zeigt dabei die installierten Anlagenkomponenten an einem exemplarischen Sockel und verdeutlicht den Thermalölfluss zwischen Thermalölkreislauf (Sekundärkreislauf) und Sockelkreisläufen (Primärkreisläufe) inkl. Temperaturverlauf (Darstellung ohne Isolierung und Schaltschrank während des Aufbaus. Dies dient der besseren Veranschaulichung).



Abb. 6: Thermalölfluss zwischen Thermalölkreislauf (Sekundärkreis) und Sockelkreisläufen (Primärkreis),



Abb. 7: Einbindung Thermalölsammel-tank

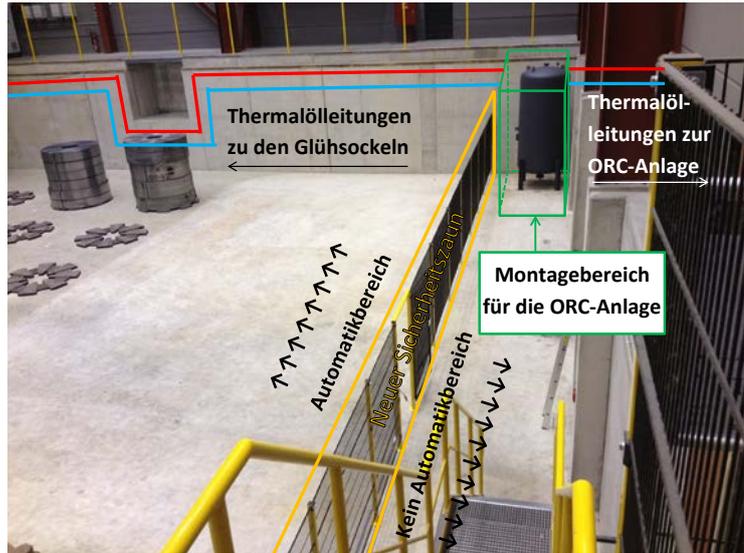


Abb. 8: Sicherheitszaun zur sicheren Trennung zwischen Montagebereich und Automatikbereich



Abb. 9: Aufstellen, Montage und Einbindung des DeVeTec-Containers und des ASCENTEC-Containers und deren Verbindung



Abb. 10: Anlagentechnik ASCENTEC-Container (Wärmeübertragung von Thermalöl auf Ethanol)



Abb. 11: Anlagentechnik DeVeTec-Container (ORC-Kolbenmotor und Generator zur Entspannung des Ethanoldampfes)

2.3.4 Erfolgskontrolle und Definition und Umsetzung Optimierungsmaßnahmen

Maßnahme I: Leistungserhöhung der Wärmeauskopplung aus den Sockeln

Ausgangspunkt

Nach einem sicherheitskritischen Zwischenfall an einer Dichtung an einem Glühsockel im März 2016 musste der Wasserstoff-Volumenstrom über den Thermalöl-Wärmetauscher aus Sicherheitsgründen gedrosselt werden. Dadurch wurde die gewinnbare Wärmemenge und -leistung einer jeden Glühreise reduziert.

Lösungsansatz

Im Kern sollte hier die Optimierung der Klappensteuerung und Softwareänderungen zur optimierten Fahrweise der Klappen vorgenommen werden, um die gewinnbare Wärmemenge und -leistung wieder erhöhen zu können. Die technische Herausforderung bestand darin, die richtige Balance zwischen folgenden Punkten zu finden:

- Vermeidung einer Überbeanspruchung der Haubenglühanlage
- Vermeidung einer Überschreitung der metallurgisch zulässigen Grenzen des geglühten Materials

- Minimierung der für die Auskopplung der maximalen Wärmemenge für die Stromerzeugung benötigten Zeit

Da die Gefahr einer kostenintensiven Überbeanspruchung der Haubenglühanlage oder des geglühten Materials bestand, war eine besonnene Herangehensweise unbedingt erforderlich.

Ergebnis

Die Maßnahme I zur Leistungserhöhung der Wärmeauskopplung aus den Sockeln wurde zunächst exemplarisch an einem Sockel erfolgreich umgesetzt. Im Ergebnis konnten 46 % Steigerung der Wärmemenge (von 1.080 kW auf 1.580 kWh) und 61 % Steigerung der maximalen Wärmeleistung (von 298 auf 480 kW) gegenüber dem Stand zum Beginn der Maßnahme (nach der o. a. sicherheitsrelevanten Drosselung) erreicht werden. Dies ist von großer Bedeutung, denn wie sich im Rahmen des Vorhabens herausgestellt hat, ist der Wirkungsgrad der Umwandlung von Wärme in Strom degressiv von der thermischen Abwärmeleistung abhängig: Je höher die Abwärmeleistung, die der ORC-Anlage zur Verfügung gestellt wird, umso höher ist der Wirkungsgrad der Umwandlung von Wärme in Strom. Abhängig von der Abwärmeleistung stellt sich der Wirkungsgrad wie folgt dar:

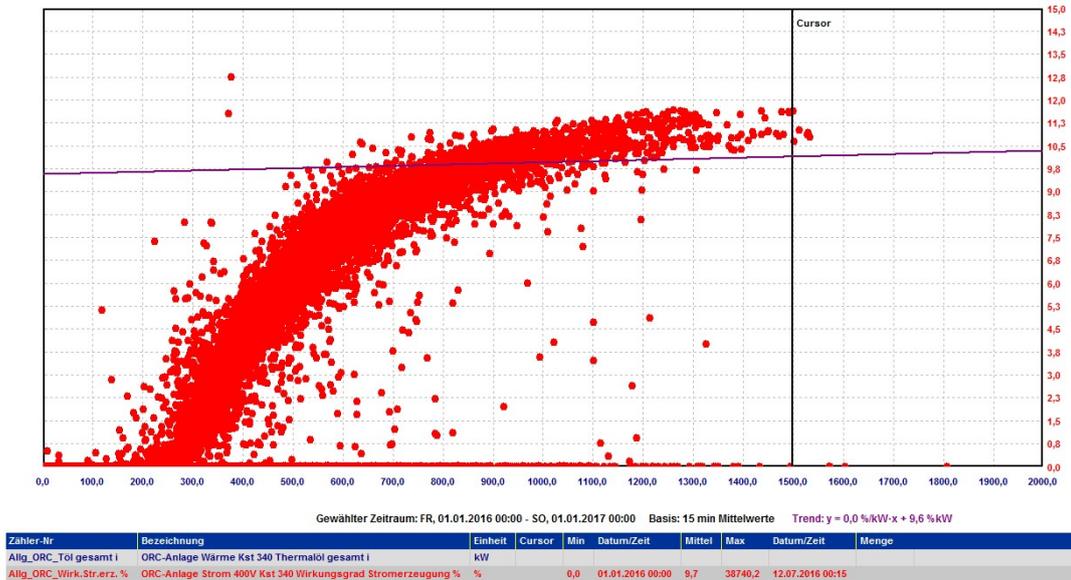


Abb. 12: Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Abwärmeleistung

Auskopplung thermische Energie in ORC-Anlage	Wirkungsgrad der Umwandlung Wärme in Strom
400 kW	2,75 %
800 kW	9,13 %
1.200 kW	10,75 %

Tab. 2: Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der auskoppelbaren Wärmeleistung

Zudem konnte erfreulicherweise die Temperaturbelastung des Bypass-Systems um sechs Prozent reduziert werden, so dass die Anlage im Vergleich zur gedrosselten Variante deutlich schonender betrieben werden kann.

In der Betriebsunterbrechungsphase Ende Juli 2017 wurde die Maßnahme I bei den verbleibenden Sockeln umgesetzt.

Maßnahme II: Variable Drehzahlregelung des ORC-Motors

Ausgangspunkt

Im Rahmen der Erfolgskontrolle des ORC-Moduls zeigte sich, dass die vertraglich vereinbarten Richtwerte hinsichtlich der Erzeugung elektrischer Leistung abhängig von der gegebenen Auskopplung thermischer Energie signifikant unterschritten wurden.

SOLL (lt. Vertrag)		IST (Stand 07/15)	Soll-/Ist-Abweichung
Auskopplung thermischer Energie	Elektrische Energie	Elektrische Energie	Minderleistung
400 kW	60 kW	11 kW	-49 kW (= 81 %)
800 kW	120 kW	73 kW	-47 kW (= 39 %)
1.200 kW	180 kW	129 kW	-51 kW (= 28 %)
1.600 kW	200 kW	offen	Offen

Tab. 3: Minderleistung im Vergleich zu vertraglich vereinbarten Richtwerten

Nach einer Situationsanalyse kamen die beteiligten Firmen zu folgendem Ergebnis hinsichtlich der Begründung der Minderleistung:

1. Der Anlagendruck korreliert mit der eingetragenen Leistung aus der Wärmerückgewinnung und kann bei dem eingesetzten Kolbenmotor der ORC-Anlage, der mit einer vorgegebenen konstanten Drehzahl (aktuell 750 U/min.) betrieben wird, nicht beeinflusst werden. Der Motor hat im unteren Leistungsbereich unter anderem deshalb einen gegenüber den ursprünglichen Annahmen reduzierten Wirkungsgrad, da ihm bei gleichem Saugvolumen (konstante Drehzahl) nur ein entsprechend geringeres Druckverhältnis zur Verfügung steht. Mit der aktuellen Drehzahl ist es bei 35 bar Druck möglich mehr als 180 kW elektrische Leistung zu erzeugen. Im Betrieb kommt aber erschwerend hinzu, dass die ORC-Anlage meistens im Kleinlastbereich arbeiten muss, da nicht ausreichend Wärmeenergie zur Verfügung steht. Ein dauerhaft konstanter Betrieb ohne Einschwingvorgänge ist oft nicht möglich und wenn, dann nur für wenige Stunden (Betriebsart: Konstante Drehzahl bei schwankendem Druck). Daraus resultiert ein gleichbleibender innerer Verlust des ORC-Kolbenmotors.
2. Bei den prognostizierten und vertraglich vereinbarten Werten wurde nicht beachtet, dass der Motor deutliche innere Verluste (Reibung etc.) aufweist. Laut DeVeTec entspricht die hierfür erforderliche Leistung in etwa 200 bis 250 kW thermischer Energie, die in der Energiebilanz nicht berücksichtigt wurde.

Lösungsansatz

Der Lösungsansatz sah vor die Betriebsart zu ändern: Anstatt einer konstanten Drehzahl bei schwankendem Druck, sollte der Druck konstant gehalten werden (bspw. bei 30 bar) und die Drehzahl des Motors je nach Wärmeangebot variiert werden (bspw. zwischen 500 und 1.000 U/min). Dadurch könnten die inneren Verluste im ORC-Kolbenmotor, gerade im unteren Drehzahlbereich, anteilig reduziert und die Effizienz gesteigert werden. Auch auf das Übersetzungsgetriebe zwischen ORC-Kolbenmotor und Generator könnte dann verzichtet werden, was die Verluste weiterhin reduzieren und die Effizienz ebenfalls steigern würde. Die wesentlichen Herausforderungen waren der installierte Generator und die Gegebenheiten vor Ort, sowie die sehr hohen Kosten eines rückspeisefähigen Frequenzumrichters. Mit dem verbauten Synchrongenerator war die Umsetzung nicht möglich. Durch dessen Selbsterregung ab einer bestimmten Drehzahl und der internen Elektronik des verbauten Spannungs-/ CosPhi-Reglers war es nicht möglich ihn an einem

Frequenzumrichter zu betreiben. Um das angestrebte Ziel zu erreichen, hätte der Synchrongenerator durch einen Asynchrongenerator ersetzt werden müssen.

Abwägungen zur Maßnahmenumsetzung

Der Lösungsansatz „variable Drehzahlregelung“ und die damit verbundene Reduzierung der inneren Verluste des ORC-Kolbenmotors, sowie der Wegfall der Verluste durch das eingesetzte Getriebe, wäre lt. Aussage der Anlagenbauer voraussichtlich dazu geeignet, den Wirkungsgrad und damit die Effizienz der Anlage (bei geringer auskoppelbarer thermischer Energie) zu steigern. Diesen prognostizierten Vorteilen standen jedoch auch mögliche Nachteile gegenüber, die es genau zu untersuchen galt:

- Der neue Generator würde nicht immer im optimalen Drehzahlbereich betrieben, was die Effizienz entsprechend reduziert.
- Um weiterhin mit 50 Hz und 400 V in das Firmennetz einspeisen zu können, ist ein Doppelfrequenzumrichter erforderlich. Dieser hat ebenfalls eine effizienzschmälernde Wirkung im Vergleich zu einem heute direkt angeschlossenen Generator.

Als wesentliche Herausforderung wurde es betrachtet, die Wirkzusammenhänge in Bezug auf das Gesamtsystem im Vorhinein richtig einzuschätzen. Es wäre erforderlich, durch die Maßnahme erreichbare Effizienzgewinne und -verluste im Vorfeld möglichst genau zu quantifizieren, um unnötige Umbaumaßnahmen an der BILSTEIN ORC-Anlage zu vermeiden. Es wäre nicht zielführend, wenn die neu gewonnenen Effizienzvorteile bei den Reibungsverlusten durch die neuen Komponenten eliminiert würden.

Zudem war zu beachten, dass im Rahmen der Ausbaustufe II acht weitere Sockel in Betrieb genommen werden sollten. In diesem Zusammenhang war zu erwarten, dass sich die Gleichmäßigkeit der Abwärmeleistung steigern und die weniger effizienten niedrigen Abwärmeleistungen nicht mehr so häufig vorkommen würden. Vor diesem Hintergrund war auch die Wirtschaftlichkeit einer Investition in Maßnahme II kritisch zu hinterfragen.

Die Maßnahme II wurde schließlich aufgrund dieser Abwägungen, wie im Zwischenbericht aus dem November 2017 bereits dargestellt, nicht unmittelbar umgesetzt. Hinzu kam, dass die Erarbeitung einer Lösung von DeVeTec mit ABB, dem Lieferanten des Frequenzumrichters, im Juli 2017 von der vorläufigen Insolvenz der DeVeTec unterbrochen wurde. Zu diesem Zeitpunkt konnte bereits ermittelt werden, dass die Konstellation aus Asynchrongenerator und rückspeisefähigem Frequenzumrichter realisierbar wäre. Die Untersuchungen der möglichen effizienzseitigen Auswirkungen der Anpassung auf das Gesamtsystem war jedoch noch nicht abgeschlossen.

2.3.5 Umsetzungsphase Ausbaustufe II

Nachdem durch die Erweiterung der Haubenglühanlage von 16 auf 24 Sockel die Voraussetzungen geschaffen waren, erfolgte die Umsetzung der Ausbaustufe II der ORC-Anlage: Die Installation der verbleibenden acht Sockelkreise, die Erweiterung des Thermalölkreislaufes sowie die anschließende Anbindung der acht Sockelkreise an den Thermalölkreis. Nach der Inbetriebnahme, der notwendigen Abarbeitung von Restmängeln und einer Testphase folgte im Q1/2019 die Abnahme der Anlage. Das Vorhaben wurde zum 31.12.2019 abgeschlossen, nachdem alle geplanten Investitionen in vollem Umfang umgesetzt wurden.

2.3.6 Hemmnisse bei der Umsetzung des Vorhabens

Hemmnisse im Rahmen des Vorhabens bestanden wie bereits angedeutet in zeitlichen wie auch technischen und leistungsbezogenen Problemstellungen.

Die zeitlichen Problemstellungen ergaben sich insbesondere daraus, dass für die Installation der Sockelkreisläufe und des Thermalölkreislaufs der ORC-Anlage, wie eingangs berichtet nur die Wartungsintervalle und Betriebsunterbrechungsphasen der Haubenglühanlage genutzt werden konnten. Weiterhin kam es zu Verzögerungen aufgrund der hohen Auslastung der Lieferanten und zu zusätzlichen Lieferschwierigkeiten bei deren Zulieferern.

Hinzu kamen technische Probleme, die bis zur zeitweisen Stilllegung der Anlage aus Sicherheitsgründen führten. Die aufgetretenen Probleme wurden dokumentiert, analysiert und von den Lieferanten sukzessive abgearbeitet. Sie mündeten im November 2015 in der sicherheitstechnischen Freigabe der Anlage. Im März 2016 kam es zu einem weiteren sicherheitskritischen Zwischenfall in der Haubenglühanlage, der zu einer Drosselung des Wasserstoff-Volumenstroms über den Thermalöl-Wärmetauscher führte und die gewinnbare thermische Energie aus einer Glühreise reduzierte. Zu diesen technischen Problemen kam weiterhin eine signifikante Abweichung von den vertraglich vereinbarten Richtwerten hinsichtlich der Erzeugung elektrischer Energie. In diesem Zusammenhang wurden die unter 2.3.4 beschriebenen Optimierungsmaßnahmen definiert. Insgesamt führten die beschriebenen technischen und leistungsbezogenen Problemstellungen zu weiteren signifikanten Verzögerungen bei der Umsetzung der Ausbaustufe I.

Ende Juli 2017 konnte die Maßnahme I abgeschlossen werden, sodass die Ergebnisse und der Erfolg der Ausbaustufe I auf dieser Basis in einem umfassenden Zwischenbericht Ende November 2017 bewertet werden konnten.

Die Ausbaustufe II konnte im Q1/2019 mit der Abnahme der Anlage abgeschlossen werden. Im Anschluss sollten die Leistungsdaten für den qualitativen Nachweis analysiert und abschließend bewertet werden. Dies vor allem unter dem Aspekt der gleichzeitigen Wärmeauskopplung aller 24 Sockel und der davon zu erwartenden höheren Abwärmeleistung sowie deren Auswirkung auf den Wirkungsgrad (Gleichzeitigkeitsfaktor).

Weiterhin sollte eine umfassende Analyse des Gesamtsystems erfolgen, auf deren Basis über die Umsetzung der in Kapitel 2.3.4 beschriebenen Maßnahme II „variable Drehzahlregelung“ für eine mögliche Erhöhung des Wirkungsgrads des ORC-Prozesses bei der Umwandlung von Wärme in elektrischen Strom entschieden werden sollte.

Aufgrund verschiedener Faktoren konnte nach Abschluss der Ausbaustufe II in den Jahren 2019 und 2020 jedoch nicht ausreichend Wärme ausgekoppelt werden, um die geplanten abschließenden Bewertungen hinsichtlich Gleichzeitigkeitsfaktor und Umsetzung der Maßnahme II zu treffen. Zu nennen sind insbesondere:

- konjunkturell bedingt reduzierter Einsatz der Haubenglühanlage und daher keine ausreichende Abwärmeleistung;
- Modernisierung einer weiteren Haubenglühanlage, die ebenfalls an die ORC-Anlage angeschlossen wurde. Für den Zeitraum der Einbindung musste die ORC-Anlage außer Betrieb genommen werden;
- Aufwendige innere TÜV-Prüfung (nach 5 Jahren Betrieb).

Neben diesen betriebsinternen Gründen traten wiederholt technische Schwierigkeiten mit Lieferanten auf, die eine Stromauskopplung über weite Strecken unmöglich machten. Die Folgen der vorläufigen Insolvenz und der Eigentümerwechsel der Firma DeVeTec führten zudem dazu, dass im Rahmen der Projektlaufzeit abschließend entschieden wurde, von der Umsetzung der Maßnahmen II abzusehen.

Da alle geplanten Investitionen für das Vorhaben getätigt waren und eine Umsetzung der Maßnahme II zum gegebenen Zeitpunkt nicht in Frage kam, wurde schließlich entschieden es zum Ende des Jahres 2019 zu beenden.

Im Jahr 2020 wirkten sich die weltweiten wirtschaftlichen Folgen der Corona-Pandemie in verschiedener Form auch auf BILSTEIN aus, so dass bis zur Abgabe des Schlussberichts trotz mehrmaliger Verlängerung der Abgabefrist keine ausreichende Datenbasis vorlag, um den Gleichzeitigkeitsfaktor abschließend bewerten zu können.

In Abstimmung mit dem Umweltbundesamt erfolgt die Ergebnisdarstellung in Kapitel 3 dieses Berichts auf Basis der Ergebnisse der Ausbaustufe I.

2.4 Behördliche Anforderungen (Genehmigungen)

Die geförderte ORC-Anlage war Bestandteil der „Errichtung und zum Betrieb von Anlagen zur Umformung von Stahl-Anlagen zum Kaltwalzen von Stahl mit einer Bandbreite ab 650 mm“ in Hagen-Hohenlimburg, die am 11. Juli 2011 durch die Bezirksregierung Arnsberg gemäß §§ 4 und 6 des Gesetzes zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundesimmissionschutzgesetz, BImSchG) genehmigt wurde. Die Genehmigung umfasste im Wesentlichen die Erweiterung des Kaltwalzwerks.

Im Genehmigungsbescheid sind zur Emissionsbegrenzung und zum Immissionschutz Einschränkungen der Betriebszeiten (Nachtstunden) und Grenzwerte bzgl. Lärmschutz und Luftreinhaltung festgehalten.

Vom Verstromungsmodul gehen keine zusätzlichen Luftemissionen aus, vielmehr ist es geeignet, den CO₂-Ausstoß im Haubenglühprozess gegenüber dem aktuellen Stand der Technik signifikant zu reduzieren. Die Einhaltung der zulässigen Grenzwerte für Lärmemissionen wurde im Rahmen der Inbetriebnahme nachgewiesen.

2.5 Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten

BILSTEIN hat im Jahr 2011 ein Energiemonitoringsystem in Betrieb genommen und seitdem kontinuierlich ausgeweitet. Der Hersteller ist die Firma HOCHHUTH aus Wiesbaden und die Software trägt den Namen MESSDAS®. Die Zertifizierungsgesellschaft LRQG hat die Konformität zur ISO 50.001 erstmalig im Jahr 2013 bestätigt und das Zertifikat erteilt.

Heute erfasst die BILSTEIN GROUP mit MESSDAS über 6.000 Messwerte. Diese werden im 30-Sekunden-Rhythmus erfasst und in einer Datenbank für ein Jahr archiviert. Nach Ablauf eines jeden Jahres, werden die 30-Sekunden-Messwerte rollierend gelöscht.

Parallel zu den 30-Sekunden-Werten werden 15-Minuten-Mittelwerte gebildet. Diese werden ebenfalls in der Datenbank gespeichert. Im Gegensatz zu den 30-Sekunden-Werten werden die 15-Minuten-Mittelwerte nicht gelöscht und stehen dauerhaft für Langzeitauswertungen zur Verfügung.

Für die ORC-Anlage werden nach diesem Prinzip folgende Messwerte ermittelt:

- Wasserstofftemperatur vor und nach dem Wasserstoff-/Thermalölmwärmetauscher [° C]
- Thermalöltemperatur vor und nach dem Wasserstoff-/Thermalölmwärmetauscher [° C]
- Abwärmeleistung im Thermalöl am Sockel (nur exemplarisch bei 2 Sockeln) [kW]
- Thermalöltemperatur vor und nach dem Ethanol-Dampferzeugungsprozess [° C]
- Thermalölvolumenstrom im Ethanol-Dampferzeugungsprozess [m³/h]

- Abwärmennutzung im Ethanol-Dampferzeugungsprozess [kW]
- Ethanoldruck im Dampferzeuger [bar]
- Ethanoldruck vor Expander [bar abs]
- Ethanoltemperatur nach Dampferzeugung/vor Motoreintritt [° C]
- Ethanoldruck nach Expander [bar abs]
- Ethanoltemperatur nach Expander/vor Kondensator [° C]
- Ethanoltemperatur nach Kondensator [° C]
- Ethanolfördermenge Kolbenmembranpumpe [kg/h]
- Ethanoltemperatur vor Dampferzeugung [° C]
- Kühlwassertemperatur vor und nach Kondensator [° C]
- Kühlwasservolumenstrom durch den Kondensator [m³/h]
- Abwärmeleistung im Kühlwasser vom Kondensator [kW]
- Stromerzeugung Generator [kW]
- Stromeigenbedarf Pumpen etc. [kW]
- Diverse Prozessdaten zu Ventilstellungen, Pumpendrehzahlen und Betriebszuständen

Auf Basis dieser Messwerte ist es möglich die Reduzierung des Schadstoffausstoßes zu ermitteln und mit den im Antrag prognostizierten Werten abzugleichen. Die Auswertung der Ergebnisse folgt im Kapitel 3.

3 Ergebnisse

3.1 Bewertung der Vorhabendurchführung

Nach Abschluss der Ausbaustufe II und dem Ende des Vorhabens, war eine Phase zur Datensammlung und Aufbereitung geplant. Mit Hilfe der gesammelten Daten sollte eine abschließende Bewertung von Gesamtwirkungsgrad und Energieeffizienz durch die Steigerung der Wärmeleistung in Folge des Gleichzeitigkeitsfaktors erfolgen. Aufgrund verschiedener Faktoren war diese Datensammlung bis zur Einreichung des vorliegenden Berichts nicht möglich (vgl. Kapitel 2.3.6 Hemmnisse bei der Umsetzung des Vorhabens). In Abstimmung mit dem Umweltbundesamt basieren die im Folgenden dargestellten Ergebnisse und die Bewertung des Vorhabenserfolgs daher auf der Ausbaustufe I inklusive der Umsetzung der Maßnahme I (vgl. Kapitel 2.3.4). Bei der Bewertung muss vor diesem Hintergrund berücksichtigt werden, dass diese auf punktuellen Erfahrungen mit den veränderten Anlagenparametern der Maßnahme I erfolgte und keine Langzeitbetrachtung beinhaltet. Jedoch lassen sich generelle Aussagen ableiten.

Nach Abschluss der Ausbaustufe I ließ sich ein Wirkungsgrad von etwa 10 % erreichen, dargestellt anhand einer beispielhaften Glühreise. Konkret konnten 1.580 kWh_{thermisch} der für die Verstromung auskoppelbaren Energie in 158 kWh_{elektrisch} (brutto) bzw. 133,4 kWh_{elektrisch} (netto) umgewandelt werden.

Insgesamt konnten nach Abschluss der Ausbaustufe I gegenüber konventionellen Anlagen in der betrachteten Glühreise folgende Umweltentlastungen durch den ORC-Prozess erreicht werden:

Umweltentlastung	pro Charge (88,8 t bei Standardglühreise)		pro Jahr (5.730 Chargen)	
	Energierück-gewinnung in kWh	Vermeidung CO ₂ -Ausstoß in t	Energierück-gewinnung in MWh	Vermeidung CO ₂ -Ausstoß in t
Stromerzeugung (brutto)	158,0 kWh _{elektrisch}		905 MWh _{elektrisch}	
Stromerzeugung (netto)	133,4 kWh _{elektrisch}	54,4 kg	764,6 MWh _{elektrisch}	311,9 t
Energie für Heiz- und Kühlzwecke	1.152,0 kWh _{thermisch}	231,6 kg	6.601,0 MWh _{thermisch}	1.326,8 t
Summe CO₂-Reduzierung³	286,0 kg pro Charge		1.638,7 t pro Jahr	

Tab. 4: Erreichte Umweltentlastung pro Charge und pro Jahr (Stand Abschluss Ausbaustufe I inkl. Maßnahme I)

Die erreichte Umweltentlastung bedeutet eine deutliche Steigerung der Energieeffizienz durch den ORC-Prozess gegenüber dem konventionellen Haubenglühen. Bezogen auf die in der Charge vorhandenen Wärmeenergie war eine Steigerung der Energieeffizienz um rd. 16 % und eine Reduzierung des CO₂-Ausstoßes um rd. 14 % zu verzeichnen.

Die im Rahmen der Antragstellung erhoffte Reduzierung von Ausschuss durch Aneinanderkleben der Bänder (sog. Kleber) konnte nicht erreicht werden. Nach aktuellem Erkenntnisstand ist das Verkleben ein Problem, dass nur bei bestimmten Materialeigenschaften und Produktionsparametern entstehen kann und in der Abkühlphase des Rekrystallationsglühens zum Tragen kommt. Man hatte sich erhofft, dass die bessere Regelbarkeit des Abkühlprozesses im oberen Temperaturbereich und die Möglichkeit das Schutzgas langsam abzukühlen eine Reduzierung des Verklebens der Bänder zu erreichen. Dies konnte jedoch im Rahmen des Vorhabens nicht bestätigt werden, da die Kühlleistung über die Bypasskühlung in jedem Fall zu hoch ist – auch bei minimalen Regelparametern.

Insgesamt bewertete BILSTEIN das Vorhaben vor dem Hintergrund des nach der Ausbaustufe I erreichten Gesamtwirkungsgrads von 10 %, der erreichten Energieeinsparungen und damit einhergehenden CO₂-Reduzierung als Erfolg. Die dargestellten Ergebnisse lassen zudem erwarten, dass sich Gesamtwirkungsgrad und Energieeffizienz noch steigern lassen. Dies wird insbesondere bei einer weiteren Steigerung der Wärmeleistung durch eine Erhöhung der Anzahl der angeschlossenen Sockel erwartet, da dies die Wahrscheinlichkeit erhöht mit mehreren Sockeln gleichzeitig in der Langsamkühlphase zu sein und so eine höhere Wärmeleistung für den ORC-Prozess zur Verfügung stellen zu können (Gleichzeitigkeitsfaktor).

Bei Vollauslastung mit 16 Sockeln im Juni 2018 konnte gemäß Auswertung der MESSDAS-Daten folgende Gleichzeitigkeit erreicht werden (vgl. Abbildung 13):

- 90 % des Monats war an min. 1 Sockel die Wärmeauskopplung in Thermalöl aktiv
- 65 % des Monats war an min. 2 Sockel die Wärmeauskopplung in Thermalöl aktiv
- 29 % des Monats war an min. 3 Sockel die Wärmeauskopplung in Thermalöl aktiv
- 9 % des Monats war an min. 4 Sockel die Wärmeauskopplung in Thermalöl aktiv
- 1 % des Monats war an min. 5 Sockel die Wärmeauskopplung in Thermalöl aktiv

³ CO₂-Emissionsfaktoren: 408 g/kWh_{Strom}, 201 g/kWh_{Erdgas}

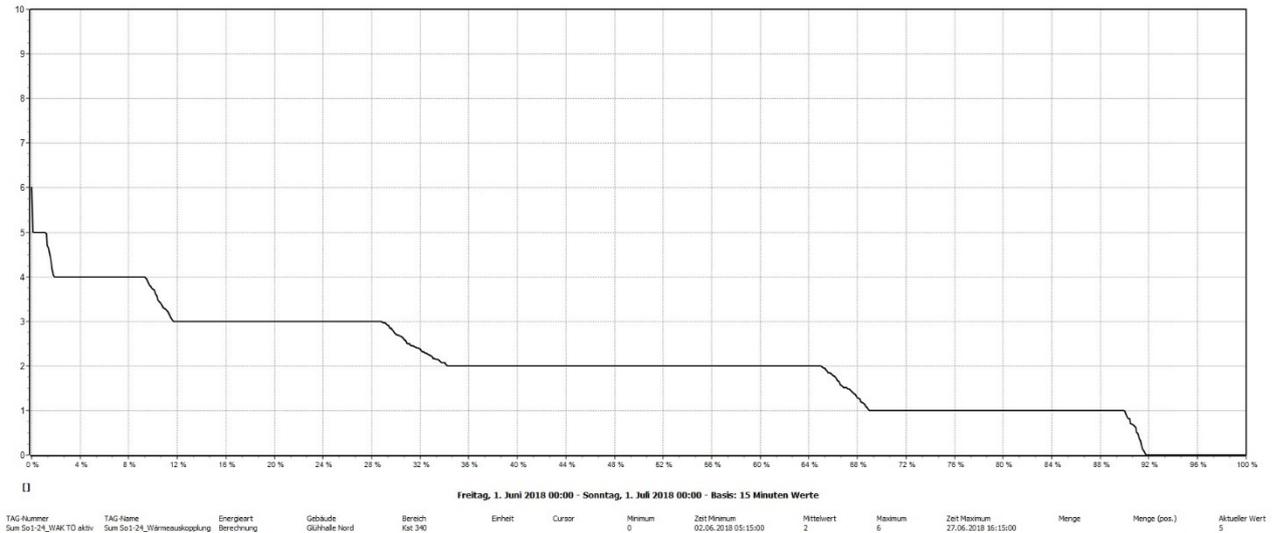


Abb. 13: Gleichzeitigkeitsfaktor Betrachtungszeitraum Juni 2018 (Quelle: BILSTEIN)

BILSTEIN geht nach wie vor davon aus, dass der in der Antragstellung angenommene Wirkungsgrad von 12,5 % unter Anwendung des Gleichzeitigkeitsfaktors bei hoher Abwärmeleistung von ca. 1.800 bis 2.000 kW erreichbar ist.

Weiterhin konnte bereits gezeigt werden, dass die Energieausbeute abhängig von der gewählten Steuerung der Haubenglühanlage stark variiert. Die obigen Ergebnisse wurden auf Basis einer Output-orientierten Steuerung der Haubenglühanlage (Vollauslastung = 5.730 Chargen pro Jahr) berechnet. Bei einer energieeffizienzorientierten Steuerung mit längerem Verbleib der Heizhaube auf den Sockeln bevor die Kühlhaube gesetzt wird, lässt sich nochmals eine deutliche Steigerung der Energieausbeute erreichen. Dies liegt darin begründet, dass die im Stahl gespeicherte Wärme dann fast ausschließlich über die Bypass-Kühlung in das Thermalöl entweichen kann. Ein dadurch erreichbarer Effekt wird produktionsabhängig sehr stark variieren. Beispielfhaft konnte mit dem zwei- bzw. dreistündigen Verbleib der Heizhaube auf dem Sockel bereits eine Steigerung der Energieeffizienz um rd. 19 % bzw. 24 % und eine Reduzierung des CO₂-Ausstoßes auf um rd. 18 bzw. 22 % bezogen auf die in der Charge vorhandene Wärmeenergie erreicht werden. Eine detaillierte Berechnung findet sich im Anhang 5.

3.2 Stoff-, Energie- und Umweltbilanz (Basis: Ergebnisse der Ausbaustufe I)

Bei der Quantifizierung der energie- und umweltrelevanten Effekte des Haubenglühprozesses ist grundsätzlich zu berücksichtigen, dass Zeitdauer und Energiebedarf von Aufheiz-, Halte- und Kühlphase werkstoffabhängig unterschiedlich sind. Bei BILSTEIN kommen beispielsweise etwa 29 verschiedene „Glühreisen“ zur Anwendung. Für die Quantifizierung der zu erwartenden Energie- und Umwelteffekte wurde seinerzeit das Referenzglühprogramm bzw. „Standardglühreise“ herangezogen, anhand dessen der Lieferant LOI gegenüber seinen Kunden die vertraglich festgelegten Anlageparameter nachweist. Die konkrete Ausgestaltung einer „Glühreise“ variiert abhängig von den angestrebten Materialeigenschaften.

Entscheidend für die durch die Verstromung rückgewinnbare Energiemenge ist die zu Beginn des Kühlprozesses herrschende Temperatur. Diese bestimmt das im geglühten Stahlcoil verfügbare thermische Energiepotential (Exergie). Die ermittelten Ausgangswerte beruhen auf von LOI durchgeführten Berechnungen des Wärmestroms (in die

Charge beim Heizen bzw. aus der Charge beim Kühlen) für einen typischen Haubenglühprozess. Hier finden die Aufheiz- und Haltephasen in der Zeit von 0 bis 16 Stunden statt, in denen das Glühgut entsprechend den gestellten Anforderungen seine Materialeigenschaften verändert.

Für die Energierückgewinnung ist die anschließende Langsamkühlphase ab Stunde 16 bis einschließlich Stunde 23 der „Glühreise“ relevant. In dem typischen Anwendungsbeispiel wurde ein abführbarer Wärmestrom mit 600 kW berechnet. Es wurde davon ausgegangen, dass dieser nicht vollständig für die Verstromung nutzbar ist. Es wurde erwartet, dass über die Bypass-Kühlung während der 7-stündigen Langsamkühlphase eine **mittlere** Leistung von 400 kW pro Sockel in das Thermalöl auskoppelbar ist (s. folgende Abbildung 13 von LOI).

Wärmestrom in die Charge beim Heizen und Kühlen

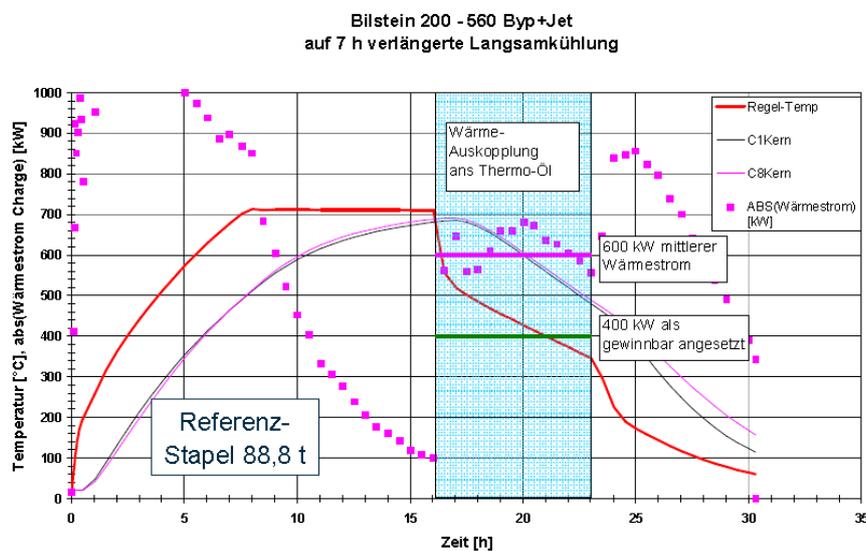


Abb. 14: Annahme des Wärmestroms in die Charge beim Heizen und Kühlen (Quelle: LOI Thermprocess GmbH)

3.2.1 SOLL- IST-Vergleich Energieeinsparung pro Charge

Die zur Verstromung zur Verfügung stehende Wärmeenergie wurde aufgrund der Parameter des Referenzstapels mit $6.683 \text{ kWh}_{\text{thermisch}}$ pro Charge berechnet. Bei der von LOI erwarteten mittlere Leistung von 400 kW pro Sockel, sollten $2.800 \text{ kWh}_{\text{thermisch}}$ zur Abwärmeverstromung zur Verfügung stehen. Die restlichen $3.882 \text{ kWh}_{\text{thermisch}}$ sollten für Heizzwecke genutzt werden (nicht im Förderumfang).

Hinsichtlich der erzeugbaren elektrischen Arbeit „Stromerzeugung durch ORC-Prozess“ ging man im Rahmen des Vorhabens gemäß den Angaben des Herstellers des ORC-Expanders von einem 15 %-igen Wirkungsgrad aus (brutto, ohne Berücksichtigung des Eigenbedarfs des ORC-Kolbenmotors). Es wurde weiterhin eine lineare Wirkungsgradcharakteristik angenommen, d. h. ein gleichbleibender Wirkungsgrad unabhängig von der verfügbaren Abwärmeleistung. BILSTEIN berechnete die erwarteten Umwelteffekte im Rahmen der Antragstellung auf dieser Basis konservativ unter Berücksichtigung eines Abschlags mit einem Wirkungsgrad von 12,5 %.

Mittlere Auskopplung thermischer Energie	Elektrische Leistung Wirkungsgrad 15 % (lt. Vertrag)	Elektrische Leistung Wirkungsgrad 12,5 % (lt. Berechnung)
400 kW	60 kW	50 kW
800 kW	120 kW	100 kW
1.200 kW	180 kW	150 kW
1.600 kW	200 kW	200 kW

Tab. 5: Ausgangsthese – Linearer Wirkungsgrad

Auf dieser Basis stellten sich im SOLL die Energieflüsse und -verluste und die daraus resultierenden Energieeffizienz- und Umwelteffekte bezogen auf eine Charge wie folgt dar:

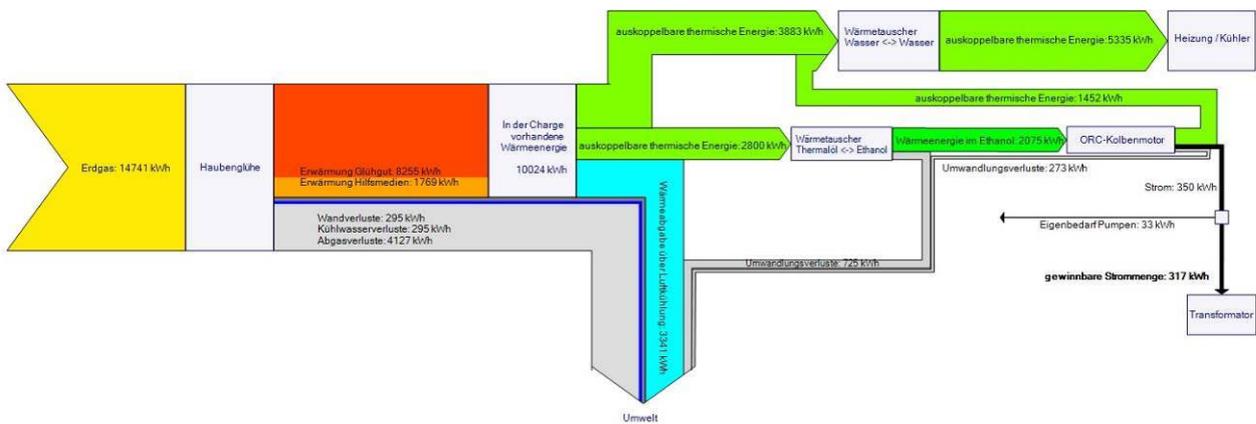
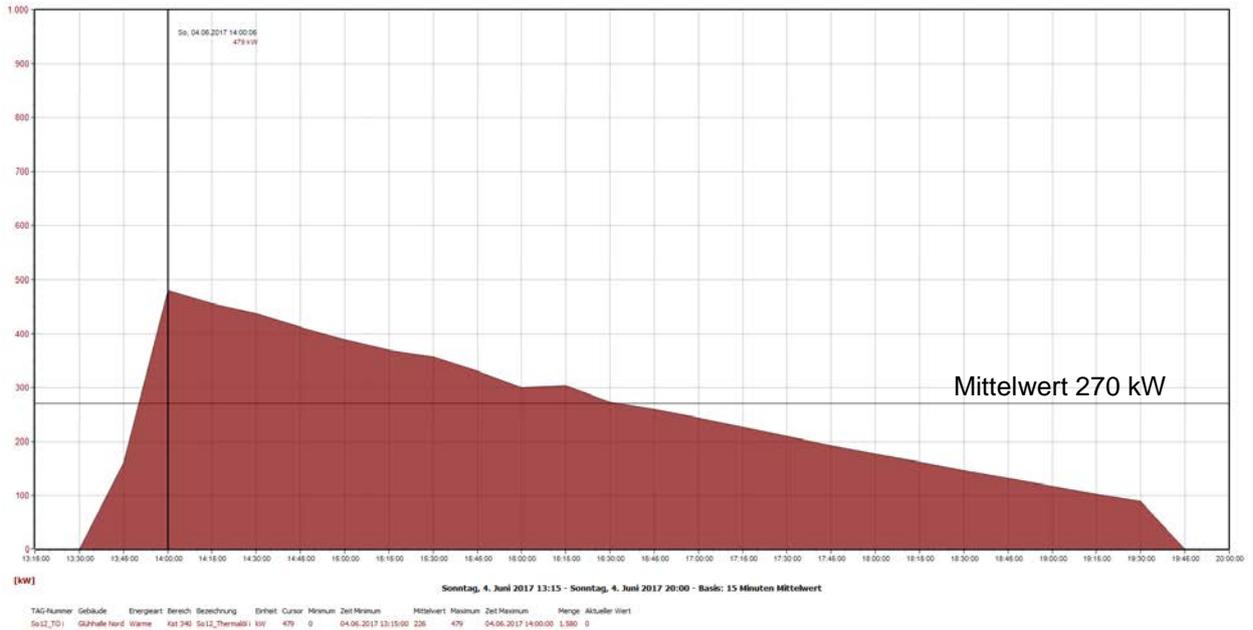


Abb. 15: Haubenglühanlage - Sankey-Diagramm Energieflüsse und -verluste (SOLL)

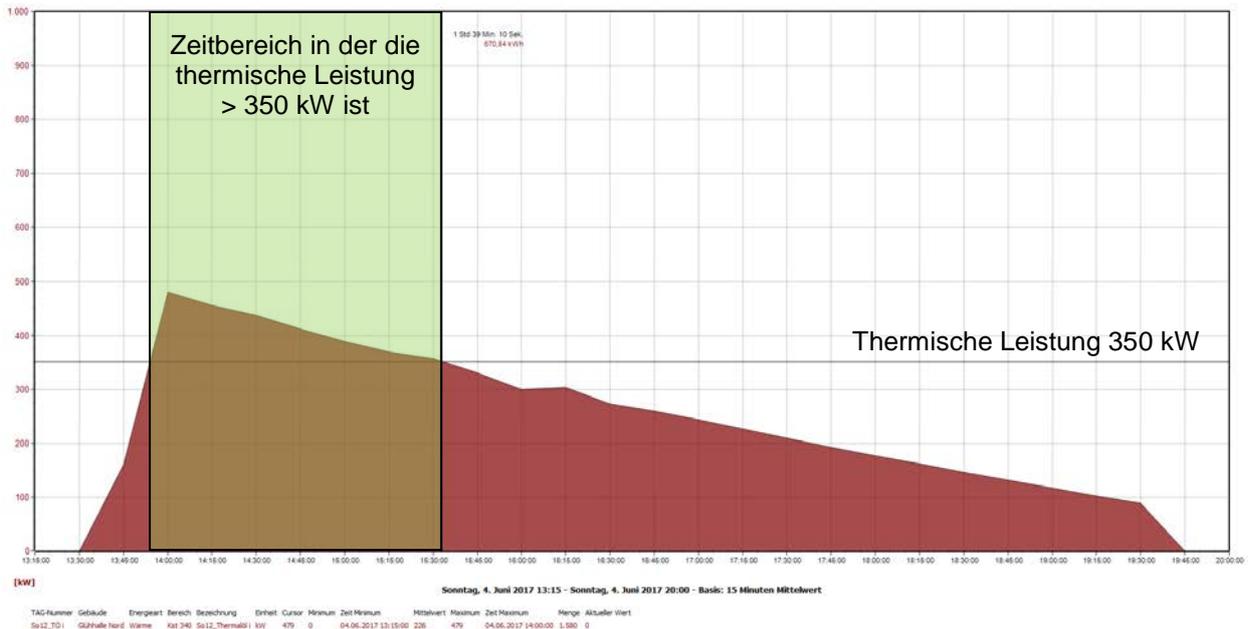
Eine größere Darstellung findet sich im Anhang 2.

In der Realität haben sich wesentliche getroffene Annahmen als nichtzutreffend erwiesen. Insgesamt ist festzuhalten, dass die Auswirkungen der systemimmanent starken Leistungsschwankungen im Rahmen des Haubenglühens und die daraus entstehenden Konsequenzen nicht in dem Maße berücksichtigt wurden, wie es hätte sein müssen. Die getroffenen Fehleinschätzungen wirken sich in einer starken Diskrepanz zwischen erwarteten und tatsächlich erreichbaren Leistungen und Umwelteffekten aus. Im Einzelnen:

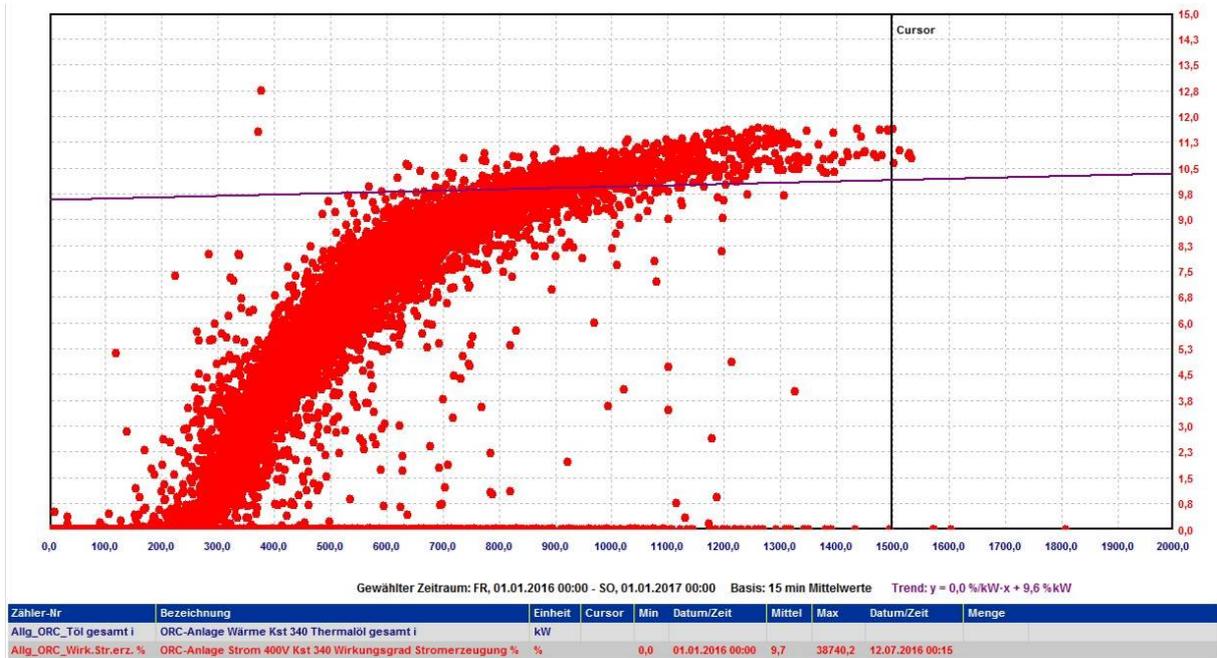
1. Die mittlere auskoppelbare thermische Leistung wurde bei 400 kW angenommen. In der Realität sind jedoch nur etwa 270 kW mittlere Leistung darstellbar.



- Die Startbedingungen für den ORC-Kolbenmotor (mindestens 350 kW) sind bei der Langsamkühlung nur eines Sockels nur für einen kurzen Zeitraum (ca. 1,5 Stunden) gegeben, d. h. erst mit mehreren Sockeln, die gleichzeitig die Phase der Langsamkühlung durchlaufen, lässt sich die notwendige thermische Leistung erreichen.



- Die Wirkungsgradcharakteristik verläuft nicht linear sondern degressiv, d. h. der Wirkungsgrad verändert sich abhängig von der verfügbaren Wärmeleistung und kann nicht konstant angenommen werden.



4. Der Wirkungsgrad von 15 % (lt. Vertrag) kann erst mit höherer thermischer Leistung erreicht werden, die in dem ORC-Prozess ausgekoppelt werden kann. In der vorhandenen Anlagenkonstellation liegt er bei maximal 11,5 %, im Durchschnitt bei rd. 10 %.

In der folgenden Tabelle sind die SOLL-Werte den tatsächlich gemessenen IST-Werten gegenübergestellt.

	SOLL	IST
Auskoppelbare thermische Leistung	400 kW	270 kW (max. 480 kW; nur zu Beginn)
Elektrische Leistung	50 kW	27 kW
Zeitraum	7 Stunden	5,89 Stunden
Auskoppelbare thermische Arbeit	2.800 kWh	1.580 kWh
Wirkungsgrad	12,5 %	10 %
Erzeugte elektrische Arbeit (Stromerzeugung brutto)	350 kWh	158 kWh

Tab. 6: SOLL-/IST-Vergleich – Gegenüberstellung wesentlicher Annahmen

Aus diesen Fehleinschätzungen resultiert (vgl. Tabelle 7), dass bereits die als Eingangsgröße für den ORC-Prozess angenommene auskoppelbare thermische Leistung von 2.800 kWh um 43 % von der real messbaren Leistung in Höhe von 1.580 kWh_{thermisch} abweicht. Hinzu kommt ein deutlich niedrigerer Wirkungsgrad bei der Umwandlung von Wärme in elektrischen Strom von durchschnittlich 10 % gegenüber den 15 % (vertraglich festgehalten) bzw. 12,5 % (bei der Berechnung der Effekte angenommen).

Auf dieser Basis stellen sich die Energieflüsse und -verluste und die daraus resultierenden Energieeffizienz- und Umwelteffekte im IST bezogen auf eine Charge wie folgt dar:

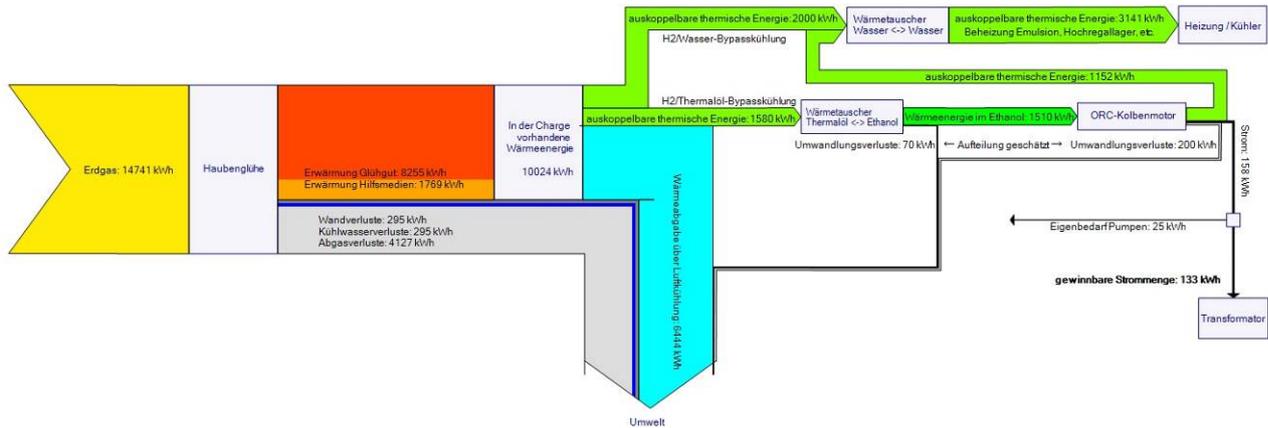


Abb. 16: Haubenglühanlage - Sankey-Diagramm Energieflüsse und -verluste (IST)

Eine größere Darstellung findet sich im Anhang 3.

Der folgenden Tabelle sind die Details zu den o. a. Sankey-Diagrammen hinsichtlich der auskoppelbaren thermischen Energie zu entnehmen.

BERECHNUNGSGRUNDLAGE sind Werte je durchschnittlicher Charge 88,8 t auf "Standardglühreise"

	SOLL Kapazitätsauslastung 100%		IST Auslastung 100% (ohne Verbleib Heizhaube)	
	Energiebetrachtung	CO ₂ -Betrachtung	Energiebetrachtung	CO ₂ -Betrachtung
Auskoppelbare thermische Energie für ORC-Prozess	2.800,0 kWh _{thermisch}	562,8 kg	1.580,0 kWh _{thermisch}	317,58 kg
Umwandlungsverluste Wärmetauscher	725,0 kWh _{thermisch}		270,0 kWh _{thermisch}	
Wärmetauscher Thermalöl zu Ethanol = Wärmeenergie im Ethanol	2.075,0 kWh _{thermisch}		1.310,0 kWh _{thermisch}	
Stromerzeugung über ORC-Kolbenmotor und Generator (brutto)* abzgl. Eigenbedarf Hilfsantriebe (Pumpen etc.)	350,0 kWh _{elektrisch}	142,8 kg	158,0 kWh _{elektrisch}	64,5 kg
Stromerzeugung über ORC-Kolbenmotor und Generator (netto)* aus ORC-Prozess auskoppelbare thermische Energie (Kondensation Ethanol)	317,0 kWh _{elektrisch}	129,3 kg	133,4 kWh _{elektrisch}	54,4 kg
Wirkungsgrad ORC-Anlage	1.725,0 kWh _{thermisch}	346,7 kg	1.152,0 kWh _{thermisch}	231,6 kg
	12,5 %		10,0 %	
Energierückgewinnung durch ORC-Prozess				
Stromerzeugung über ORC-Kolbenmotor und Generator (brutto)*	350,0 kWh _{elektrisch}	142,8 kg	158,0 kWh _{elektrisch}	64,5 kg
Stromerzeugung über ORC-Kolbenmotor und Generator (netto)* aus ORC-Prozess auskoppelbare thermische Energie	317,0 kWh _{elektrisch}	129,3 kg	133,4 kWh _{elektrisch}	54,4 kg
	1.725,0 kWh _{thermisch}	346,7 kg	1.152,0 kWh _{thermisch}	231,6 kg
Effizienzsteigerungseffekte durch ORC-Prozess				
für ORC-Prozess nutzbare Energie, die bisher ungenutzt entweicht	2.800,0 kWh _{thermisch}		1.580,0 kWh _{thermisch}	
- bezogen auf in der Charge vorhandene Wärmeenergie	27,9 %		15,8 %	
- bezogen auf Energieeinsatz Erdgas	19,0 %		10,7 %	
CO₂-Vermeidungspotentiale durch ORC-Prozess				
Energierückgewinnung gesamt		476,1 kg		286,0 kg
- davon für Stromerzeugung über ORC-Kolbenmotor und Generator (netto)		129,3 kg		54,4 kg
- davon aus ORC-Prozess auskoppelbare thermische Energie		346,7 kg		231,6 kg
Reduzierung der CO ₂ -Belastung bezogen auf die in der Charge vorhandene Wärmeenergie		23,6 %		14,2 %
Reduzierung der CO ₂ -Belastung bezogen auf den Energieeinsatz Erdgas		16,1 %		9,7 %

*CO₂-Faktor 408 g/kWh deutscher Strommix 2019 vorläufig, gemäß Umweltbundesamt 2021

Tab. 7: SOLL-/IST-Vergleich – Effekte pro Charge

Wie bereits dargestellt und der vorstehenden Tabelle 7 zu entnehmen ist, können vor diesem Hintergrund bisher 15,8 % Steigerung der Energieeffizienz und 14,2 % Reduzierung des CO₂-Ausstoßes bezogen auf die in einer Charge vorhandenen Wärmeenergie erreicht werden. Damit werden die seinerzeit angenommenen Werte signifikant unterschritten.

Die gesamte Gegenüberstellung der eingesetzten und auskoppelbaren Energie wie der Effekt in der Gegenüberstellung zwischen SOLL (analog Antragstellung) und IST (auf Basis der bei einer beispielhaften Glühreise tatsächlich gemessenen Werte), ist dem Anhang 4 zu entnehmen.

In den obigen Darstellungen und Berechnungen wird von einer Output-orientierten Steuerung der Haubenglühanlage (Vollauslastung = 5.730 Chargen pro Jahr) ausgegangen. Wie bereits bei der Antragstellung dargestellt, ist bei Energieeffizienz-orientierter Steuerung, d. h. dem längeren Verbleib der Heizhaube auf den Sockeln bevor die Kühlhaube gesetzt wird, nochmals eine signifikante Steigerung der Energieausbeute zu erwarten. Dies liegt darin begründet, dass die im Stahl gespeicherte Wärme dann fast ausschließlich über die Bypass-Kühlung in das Thermalöl entweichen kann. Ein dadurch erreichbarer Effekt wird produktionsabhängig sehr stark variieren. Beispielhaft konnte mit dem zwei- bzw. dreistündigen Verbleib der Heizhaube auf dem Sockel bereits eine Steigerung der Energieeffizienz um rd. 19 % bzw. 24 % und eine Reduzierung des CO₂-Ausstoßes auf um rd. 18 bzw. 22 % bezogen auf die in der Charge vorhandene Wärmeenergie erreicht werden. Eine detaillierte Berechnung findet sich im Anhang 5.

3.2.2 Hochgerechnete Energieeinsparungs-Effekte pro Jahr

Die geplante 24 Sockel-Haubenglühanlage sollte auf eine maximale Jahreskapazität von 509.000 t (= 5.730 Chargen à durchschnittlich 88,8 t) bei Vollauslastung ausgelegt sein.

Bei der Bewertung der in der folgenden Hochrechnung auf ein Jahr dargestellten Werte ist folgendes zu berücksichtigen:

- Eine reale Betrachtung der Umwelteffekte bezogen auf ein Jahr ist zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht möglich. Es handelt sich daher um hochgerechnete Werte bei denen von einer exemplarischen Charge ausgehend die Werte auf die Anzahl der Chargen pro Jahr hochgerechnet wurde.
- Die Übertragbarkeit der „Standardglühreise“ auf die Vielzahl der verschiedenen Glühreisen, die in der Praxis vorliegen, ist nur begrenzt gegeben.
- Der Wirkungsgrad der ORC-Anlage hängt sehr stark mit der Wärmeleistung und Dauer zusammen, die für den ORC-Prozess zur Verfügung steht. Aus den gemessenen Werten einer Charge lässt sich daher nur sehr begrenzt auf das gesamte Jahr schließen. Weiterhin ist zu erwarten, dass bei Eintreten des Gleichzeitigkeitsfaktors (mehrerer Sockel gleichzeitig in der Langsamkühlphase) insgesamt ein höherer Wirkungsgrad erzielt werden kann.

Rechnet man trotz dieser „Unschärfen“ analog der Berechnung der Umwelteffekte im Rahmen der Antragstellung die Effekte pro Jahr hoch, ergeben sich durch die Verstromung der Prozessabwärme und die zusätzlich im ORC-Prozess als Koppelprodukt anfallenden Heizwärme mit einer 24-Sockel-Haubenglühanlage folgende Effekte gegenüber dem konventionellem Haubenglüh:

BERECHNUNGSGRUNDLAGE sind Werte je durchschnittlicher Charge 88,8 t auf "Standardglühreise"

	SOLL (Hochrechnung) 5.730 Chargen jährlich (24 Sockel) Kapazitätsauslastung 100%				IST (Hochrechnung) 5.730 Chargen jährlich (24 Sockel) Kapazitätsauslastung 100%			
	Energiebetrachtung		CO ₂ -Betrachtung		Energiebetrachtung		CO ₂ -Betrachtung	
Energieeinsatz Erdgas pro Jahr	84.464,8	MWh _{thermisch}	16.977,4	t	84.464,8	MWh _{thermisch}	16.977,4	t
davon pro Jahr auskoppelbare Wärmemenge für ORC-Prozess	16.044,0	MWh _{thermisch}	3.224,8	t	9.053,4	MWh _{thermisch}	1.819,7	t
Energiewiedergewinnung im ORC-Prozess pro Jahr								
- durch Stromerzeugung (netto)*	1.816,4	MWh _{elektrisch}	741,1	t	764,4	MWh _{elektrisch}	311,9	t
- für Heizwärme**	9.884,3	MWh _{thermisch}	1.986,7	t	6.601,0	MWh _{thermisch}	1.326,8	t
Vermiedener CO ₂ -Ausstoß durch Verstromungskonzept pro Jahr								
- absolut			2.727,8	t			1.638,7	t
- relativ			16,1	%			9,7	%

*CO₂-Faktor 408 g/kWh deutscher Strommix 2019 vorläufig, gemäß Umweltbundesamt 2021

**CO₂-Faktor Erdgas 201 g/kWh

Tab. 8: SOLL-/IST-Vergleich – Hochgerechnete Effekte auf 24-Sockel-Haubenglühanlage BILSTEIN

In Deutschland waren bei Vorhabenbeginn ca. 140 Sockel mit der LOI Bypass-Kühlung installiert, die die Voraussetzung für die Realisierung des umgesetzten ORC-Prozesses darstellten. Dies entspricht ca. 6 Anlagen. Zur Abschätzung der in Deutschland mit dem neuartigen Verstromungskonzept allein aus der Kaltbandbranche möglichen Effekte, wurden die vom BILSTEIN-Vorhaben erwarteten Effekte mit dem Faktor 6 hochgerechnet, wobei je Anlage 5.730 Chargen als Vollaustung unterstellt wurden.

BERECHNUNGSGRUNDLAGE sind Werte je durchschnittlicher Charge 88,8 t auf "Standardglühreise"

Werte pro Jahr	SOLL (hochgerechnet)		IST (hochgerechnet)	
	BILSTEIN 24 Sockel Haubenglühe Vollaustung 100%	DEUTSCHLAND Vollaustung 100%	BILSTEIN 24 Sockel Haubenglühe Vollaustung 100%	DEUTSCHLAND Vollaustung 100%
Auslastung (Chargen) je Anlage	5.730	5.730	5.730	5.730
Auskoppelbare Energie in MWh _{thermisch}	16.044	96.264	9.053	54.320
Stromerzeugung (netto) in MWh _{elektrisch} *	1.816	10.898	764	4.586
Heizwärme in MWh _{thermisch} **	9.884	59.306	6.601	39.606
CO ₂ -Ausstoß vermieden in t	2.728	16.367	1.639	9.832

*CO₂-Faktor 408 g/kWh deutscher Strommix 2019 vorläufig, gemäß Umweltbundesamt 2021

**CO₂-Faktor Erdgas 201 g/kWh

Tab. 9: SOLL-/IST-Vergleich – Hochgerechnete Effekte in Deutschland

3.3 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Die Investitionskosten für das Vorhaben (24 Sockel) beliefen sich auf insgesamt rd. 2,9 Mio. Euro. Die wesentlichen Kostenpositionen waren die Kosten für Thermalölkreislauf und 24 Sockelkreise, ORC-Modul sowie Wärmetauscher inklusive deren Montage und Inbetriebnahme, die 95 Prozent der Investitionskosten ausmachten. Die ursprünglich erwarteten Investitionskosten von rd. 3,5 Mio. Euro wurden um rd. 0,6 Mio. Euro unterschritten. Die Investition wird über 10 Jahre abgeschrieben. Es werden durchschnittliche jährliche Betriebskosten von rd. 15.000 Euro für Wartung und verpflichtende TÜV-Prüfungen erwartet.

Diesen Kosten stehen je nach Auslastung und Steuerung der Haubenglühe durchschnittliche jährliche Einsparungen an Stromkosten, Heizkosten und CO₂-Zertifikaten in Höhe von rd. 234.000 bis 325.000 Euro gegenüber.

Die erreichbaren Einsparungen stehen in engem Zusammenhang mit der Auslastung der Haubenglühe und der auskoppelbaren thermischen Arbeit, die in der Erzeugung von Strom bzw. Energie für Heizzwecke resultiert. In der nachfolgenden Amortisationsrechnung (Pay-off Methode) sind drei Szenarien dargestellt, um diese Zusammenhänge abzubilden.

- Szenario 1: Realistische Auslastung der Haubenglühanlage unter Berücksichtigung von Stillstandszeiten, Wartung etc. (Beispieljahr 2017, hochgerechnet auf 24 Sockel). Diese liegt bei 3.300 Glühreisen, also etwa bei 60 Prozent der maximal möglichen Auslastung. Im Szenario 1 wird eine flexible Gestaltung der Kühlphase angenommen, d. h. es erfolgt ein Wechsel zwischen Output-orientierter und Energieeffizienz-orientierter Steuerung der Kühlphase. Bei der Output-orientierten Steuerung verbleibt die Heizhaube nicht länger als erforderlich auf den Sockeln, dann erfolgt die Kühlung. In diesem Szenario ist eine Auskopplung von rd. 1.600 kWh thermischer Arbeit realistisch. Bei der Energieeffizienz-orientierten Steuerung verbleibt die Heizhaube mehrerer Stunden auf den Sockeln und eine um den Faktor 2,3 höhere Auskopplung von bis 3.600 kWh thermischer Energie kann erreicht werden. Dies liegt darin begründet, dass die im Stahl gespeicherte Wärme dann fast ausschließlich über die Bypass-Kühlung in das Thermalöl entweichen kann.
- Szenario 2: Vollauslastung der Haubenglühanlage (gemäß Antrag). Diese liegt bei 5.730 Glühreisen ohne Berücksichtigung von Stillstandszeiten, Wartung etc. Im Szenario 2 wird eine Output-orientierte Steuerung der Kühlphase angenommen.
- Szenario 3 Geringe Auslastung der Haubenglühanlage (Beispieljahr 2019). Diese liegt bei 2.041 Glühreisen, also bei 35 Prozent der maximal möglichen Auslastung. Im Szenario 3 wird eine Energieeffizienz-orientierte Steuerung der Kühlphase angenommen.

Die Rentabilität wird nachfolgend anhand der drei skizzierten Szenarien mit Hilfe der Durchschnittsmethode wie folgt berechnet:

$$\text{Amortisationszeit in Jahren} = \frac{\text{ursprünglicher Kapitaleinsatz}}{\text{Gewinn pro Jahr} + \text{jährliche Abschreibungen}}$$

Amortisationsrechnung (Pay-off Methode)	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Auslastung Haubenglühe	60%	100%	35%
Anschaffungskosten		2.932.293 €	
Zuschuss UIP		580.230 €	
Nutzungsdauer in Jahren		10	
Lineare AfA pro Jahr		293.229 €	
Ø Betriebskosten pro Jahr		14.760 €	
- Wartung			
- TÜV-Prüfung			
Ø Einsparungen pro Jahr	324.801 €	303.730 €	233.688 €
- Stromkosten			
- Heizkosten			
- CO ₂ -Zertifikate			
Ø Kapitalrückfluss pro Jahr	603.270 €	582.199 €	512.158 €
Amortisation ohne Zuschuss in Jahren	4,9	5,0	5,7
Amortisation mit UIP-Zuschuss in Jahren	3,9	4,0	4,6

Dementsprechend wird sich die Investition je nach Auslastung der Haubenglühe, ohne Berücksichtigung des erhaltenen Zuschusses aus dem Umweltinnovationsprogramm, nach 5-6 Jahren amortisieren.

3.4 Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren

Zum Zeitpunkt der Antragstellung entsprach es dem Stand der Technik, dass die dem Kaltband beim Abkühlvorgang entzogene Wärme über das Kühlwasser/die Luftkühlung entwich und ungenutzt verloren ging bzw. allenfalls zur Hallenbeheizung diente.

Zur Nutzung der Abwärme kamen grundsätzlich in Frage

- die partielle Rückführung als Prozesswärme für den Anwärmprozess in der Heizhaube über einen Wärmetauscher gemäß LOI-Bypass-Konzept
- Einspeisung in ein Nahwärmenetz

Beide Ansätze wurden jedoch zum Zeitpunkt der Antragstellung nicht zielführend betrachtet. Gründe hierfür waren insbesondere das niedrige Temperaturniveau, die begrenzt zur Verfügung stehenden Temperaturdifferenzen, unterschiedliche Abwärme- und Wärmebedarfszyklen und der diskontinuierliche Wärmeanfall (vgl. dazu auch Kapitel 1.2 Ausgangssituation).

Die eingesetzte ORC-Technologie erschließt die Nutzung von "Abfallwärme" auf einem Temperaturniveau zwischen 200 und 400 Grad Celsius durch deren technisch und wirtschaftlich darstellbare Verstromung. Gegenüber dem konventionellen Glühen erhöht die Verstromung die Energieeffizienz und führt zu einer Reduzierung des CO₂-Ausstosses.

Der stufenlos regelbare Kolbenmotor (Expander) der ORC-Anlage kommt mit der prozessbedingt diskontinuierlichen und stark schwankenden Wärmezufuhr aus der Haubenglühanlage aus, was ihn gegenüber einer üblicherweise eingesetzten Wasserdampfturbine auszeichnet. Es können unterschiedliche Betriebspunkte des Verstromungsprozesses mit geringeren Wirkungsgradverlusten dargestellt werden, weiterhin kann auf einen

Hochtemperatur-Wärmespeicher verzichtet werden, der bei einer Wasserdampfturbine zwingend erforderlich wäre.

Der Wasserdampfturbinenprozess ist erst bei Temperaturen oberhalb von 300° C und für elektrische Leistungen über 1 MW besonders vorteilhaft. Beim umgesetzten ORC-Prozess wird der Kolbenmotor anstatt mit Wasserdampf mit dem Dampf von organischen Flüssigkeiten betrieben. Dies weist aufgrund der niedrigen Verdampfungstemperaturen dann Vorteile auf, wenn – wie bei BILSTEIN der Fall – das zur Verfügung stehende Temperaturgefälle zwischen Wärmequelle und Wärmesenke zu niedrig für den Betrieb einer Wasserdampfturbine ist.

In die ORC-Anlage können weiterhin problemlos weitere Quellen der „Abfallenergie“ angebunden werden, z. B. ein BHKW, um den Prozess auf ein noch höheres Niveau eines wirtschaftlich sinnvollen Wirkungsgrades anzuheben. Gegenüber dem konventionellen Glühen wird durch die Verstromung die Energieeffizienz erhöht und eine Reduzierung der CO₂-Emissionen erreicht.

4 Empfehlungen

4.1 Erfahrungen aus der Praxiseinführung

Aus der Praxiseinführung bei BILSTEIN sind folgende wesentliche Empfehlungen abzuleiten:

- Eine projektübergreifende Koordination durch einen Partner mit fundiertem Gesamtwissen über das Zusammenspiel der einzelnen Gewerke und deren Abstimmung auf die Kundenanforderungen ist wesentlich für den Erfolg eines solchen Vorhabens.
- Es empfiehlt sich die Inbetriebnahme vom realen Betrieb abzukoppeln, um unabhängiger zu sein. Ein Ansatz dazu könnte z. B. der Einsatz einer temporären Defizitbeheizung des Thermalöls sein.
- Der Gleichzeitigkeitsfaktor ist wesentlich für die erfolgreiche Abwärmeverstromung. Auf Basis der BILSTEIN Erfahrungen sind 12 Sockel das Minimum, besser sind 16 Sockel, um einen zufriedenstellenden Wirkungsgrad zu erreichen.
- Bei höherer Abwärmeleistung (> 200 kW_{elektrisch}) kann es sinnvoll sein ein kombiniertes Konzept aus ORC-Turbine (für die Grundlast) und Kolbenmotor (für die Spitzenlasten) einzusetzen, insbesondere in der niedrigeren Wartungsintensität der ORC-Turbine werden hier Vorteile gesehen.

4.2 Modellcharakter (Verbreitung und weitere Anwendung des Verfahrens / der Anlage)

In Deutschland sind derzeit rd. 1.200 Sockel (Sockel = branchenübliche Einheit; durchschnittlich 12 Sockel pro Anlage) im Einsatz. Bei einer durchschnittlichen Lebensdauer von 25 Jahren werden jährlich ca. 2-5 neue Haubenglühanlagen in Betrieb genommen. Das neuartige Verstromungskonzept ist auf alle neuen Haubenglühanlagen und alle Haubenglühanlagen, die nach dem Bypass-Konzept gebaut worden sind, übertragbar und lässt einen hohen Multiplikatoreffekt in der Kaltbandbranche erwarten.

Da das Verstromungskonzept prinzipiell für vergleichbare Wärmebehandlungsprozesse in anderen Branchen, wie z. B. Eisen- und Stahlherstellung, Aluminiumhütten und -gießereien, Glas- und Keramikherstellung, Textil- und Papierverarbeitung geeignet ist, sind auch über die Kaltbandbranche hinausreichende Multiplikatoreffekte zu erwarten.

Ein Beispiel aus einem Stahlschmiedebetrieb findet sich hier: <https://www.energieagentur.nrw/klimaexpo/abwaermeverstromung>

4.3 Zusammenfassung

Wie bereits dargestellt, wertet BILSTEIN das Vorhaben als Erfolg – trotz der in 2.3 beschriebenen Hindernisse und der in 3.2 beschriebenen Abweichungen im SOLL-/IST-Vergleich zwischen den Richtwerten gemäß Antragstellung und den tatsächlich erreichten Ergebnissen.

Zunächst ist diese abschließende Bewertung damit zu begründen, dass die ORC-Anlage mit einem Wirkungsgrad von rd. 10 % im Bereich der in der Literatur angeführten Erwartungswerte von 8-20 % solcher Anlagen liegt.

Der wesentliche Grund ist jedoch, dass sich auf Basis der erzielten Ergebnisse und gewonnenen Erkenntnisse ableiten lässt, dass sich der Wirkungsgrad mit höherer auskoppelbarer Wärmeleistung aus der Langsamkühlphase und mit geringeren Schwankungen in der Wärmebereitstellung noch steigern lässt. Beides ist zu erwarten, wenn sich mehrere Sockel gleichzeitig in der Langsamkühlphase befinden (Gleichzeitigkeitsfaktor). Die bereits erfolgte Einbindung einer weiteren Haubenglühe mit 8 Sockeln im Hause BILSTEIN ist bereits erfolgt und ermöglicht weitere Potenziale, die Einbindung zusätzlicher Sockel ist in den kommenden Jahren geplant.

Das Vorhaben hat gezeigt, dass die Abwärmeverstromung bei Haubenglühanlagen möglich und erfolgreich sein kann. Es hat aber auch gezeigt, dass sie – insbesondere bei bestehenden Leistungsschwankungen und folglich bei vergleichsweise niedriger und vor allem ungleichmäßiger auskoppelbarer Wärmeleistung – erst ab einer größeren Anzahl Sockel energetisch und wirtschaftlich sinnvoll ist.

Weiterhin bestehen in diesem hochkomplexen System, in dem eine Vielzahl von Komponenten und verschiedenste Prozessmedien zusammenwirken und beherrscht werden müssen, mittelfristig weitere Optimierungs- und Effizienzsteigerungspotentiale zur Verfügung durch z. B.:

- die Umsetzung der variablen Drehzahlregelung (Maßnahme II), d. h. flexible Anpassung der Drehzahl an die verfügbare Wärmeleistung (= Reduzierung der inneren Verluste des ORC-Kolbenmotors).
- die Ausnutzung der vollen Drehzahl von 1.068 U/min (aktuell Drosselung auf 750 U/min zur Reduzierung der Reibungsverluste des ORC-Kolbenmotors), die dann sinnvoll ist, wenn eine höhere Wärmeleistung verfügbar ist und somit der Nutzen durch einen höheren Output höher ist als die Nachteile durch die höheren Reibungsverluste. Eine weitere Anhebung auf 1.500 U/min hat DeVeTec seinerzeit bereits als möglich erachtet.

Essenziell ist es jedoch, wie im Zusammenhang mit der beschriebenen Maßnahme II bereits dargestellt, bei diesen Optimierungsmaßnahmen immer das Gesamtsystem und die bestehenden Wirkungszusammenhänge zu berücksichtigen. Die Schaffung lokaler Optima durch die Optimierung einzelner Systemelemente ist nicht zielführend.

Langfristig sind weitere positive Effekte durch eine effizienzorientierte Steuerung (vgl. Gliederungspunkt 3.2) und eine davon zu erwartende Steigerung der Energieausbeute zu erreichen. Zum aktuellen Zeitpunkt steht jedoch zunächst ein Betrieb der Anlage unter „normalen“ Produktionsbedingungen im Vordergrund. Erreichbare Effekte sind zum aktuellen Zeitpunkt nicht abschließend zu quantifizieren und werden abhängig von den Erfordernissen der Produktion stark variieren.

5 Veröffentlichungen zum Vorhaben

Folgende Veröffentlichungen bzw. öffentlichkeitswirksame Aktionen im Zusammenhang mit dem Vorhaben wurden bereits getätigt bzw. sind geplant:

Information von Kunden, Lieferanten, interessiertem Fachpublikum



Information im Rahmen der Internetpräsenz der BILSTEIN GRUPPE

Pressemitteilung vom 13.11.2018

<https://www.bilstein-gruppe.de/cms/wp-content/uploads/2016/12/PM-ORC-Anlage-BILSTEIN-GROUP-DE-20181112.pdf> (2018)

Newsletter Ausgabe 01/2019

https://www.bilstein-gruppe.de/cms/wp-content/uploads/2016/12/Newsletter_BILSTEIN-GROUP_1-2019_DE.pdf (2019)



Information in der werksinternen Zeitung der BILSTEIN Gruppe



Informationen im Rahmen von Veranstaltungen

Preisverleihung KlimaExpo.NRW <https://www.energieagentur.nrw/klimaexpo/bilstein> (2016)

Anlagenbesichtigung und Präsentation im Rahmen des Parlamentskreises Energieeffizienz (2018) in Kooperation mit dem Umweltbundesamt

Kommunikationsmaßnahmen über Branchen- und Verbandsgrenzen hinaus



VDI Zentrum für Ressourceneffizienz (ZRE)

Praxisbeispiel im Informationsfilm des VDI ZRE „Stromerzeugung aus industrieller Abwärme“(2017) <https://www.youtube.com/watch?v=nV6w1hnlcWM>

auch als Best Practice Beispiel referenziert in GIESSEREI Heft 02/2018

<https://www.giesserei.eu/magazin/mediathek/videos/2018/best-practice-beispiele-fuer-abwaermenutzung/>

Weitere

<https://www.industr.com/de/wie-abw%C3%A4rme-strom-2314926> (2017)

https://static.dc.siemens.com/datapool/industry/automation/Tech-Art/2017/2017_02_23_CI_DeVeTec/FAV-07-2017_Bilstein_DeVeTec_de_Web.pdf (2017)

<https://www.blechnet.com/rueckgewinnung-und-verstromung-von-prozesswaerme-durch-orc-anlage-a-776340/> (2018)



MUT e. V. ist eine Vereinigung deutscher Unternehmen der Metallerzeugung, der Metallverarbeitung und des Metallhandels. Er repräsentiert die Metallindustrie und ihr Wertschöpfungsnetz als Ganzes. Zweck des Vereins ist der Austausch über Branchen- und Verbandsgrenzen hinaus und das Erarbeiten neuen Wissens zum Ausbau des Metallstandorts Deutschland.

Der Verein entwickelt Lösungen zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Metallwirtschaft – vorrangig unter dem Aspekt globalisierter Märkte und mit assoziierten Technologiepartnern für nachhaltigen Umgang mit den Ressourcen Energie, Rohstoffe und Information.

Im Rahmen des MUT e.V. fanden themenspezifische Vorträge statt, um das Wissen aus dem Vorhaben innerhalb des Vereins zu teilen und einen Multiplikationseffekt innerhalb der deutschen Metallindustrie zu erreichen.

6 Literatur

IZES (2017): Technologiebericht TF 6.3 Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme innerhalb des Forschungsprojekts TF Energiewende, Saarbrücken 2017

https://www.energieforschung.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/70018E1D920B3586E0539A695E86D89A/current/document/6.3_Stromerzeugungstechnologien_zur_Abwaermenutzung_final_v2.pdf

Fraunhofer IPM (2016): Technologiebewertung im Rahmen des Forschungsprojektes „Erhebung, Abschätzung und Evaluierung von industrieller Abwärme in Deutschland – Potentiale und Forschungsbedarf“ im Auftrag des BMWi 2016

<https://doi.org/10.2314/KXP:1671432053>

Brückner (2016): Brückner, S.: Industrielle Abwärme in Deutschland. Dissertation an der TU München, München 2016

<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20161125-1310042-1-5>

Sächsische Energieagentur – SAENA GmbH (2016): Industrielle Abwärmenutzung, Dresden 2016

https://www.saena.de/download/Broschueren/BU_Technologien_der_Abwaermenutzung.pdf

IZES (2015): Studie Abwärmenutzung – Potentiale, Hemmnisse und Umsetzungsvorschläge. Kurzstudie im Auftrag des BMUB, Saarbrücken 2015

http://www.izes.de/sites/default/files/publikationen/20150901_BMUB_Studie_Abwaerme_V.1.1.pdf