



Gustav Grimm Edelstahlwerk



Forschungsvorhaben gefördert vom
Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des
Förderprogramms KMU Innovativ – Energieeffizienz / Klima-
schutz



Betreut durch
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR Projekt-
träger)



Nutzung von Niedertemperaturabwärme zur Eigenstromerzeugung am Beispiel eines KMU-Schmiedebetriebs (NEBS)

von

W. Schneider, J. Grünke
(Gustav Grimm Edelstahlwerk GmbH & Co. KG)

F. Mintus, B. Stranzinger
(VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH)

Schlussbericht

Förderkennzeichen: 01LY0904 A, 01LY0904 B

BFI Bericht Nr. 32.014

Düsseldorf, September 2014

VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH

VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH

40237 Düsseldorf, Sohnstraße 65

Forschungsvorhaben gefördert vom
Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Förderprogramms KMU
Innovativ – Energieeffizienz / Klimaschutz

Betreut durch
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR-Projektträger)

Nutzung von Niedertemperaturabwärme zur Eigenstromerzeugung am Beispiel eines KMU-Schmiedebetriebs (NEBS)

von

W. Schneider, J. Grünke
(Gustav Grimm Edelstahlwerk GmbH & Co. KG)
F. Mintus, B. Stranzinger
(VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH)

Schlussbericht

Förderkennzeichen: 01LY0904 A, 01LY0904 B

BFI Bericht Nr. 32.014

Kurzfassung

In der Eisen- und Stahlindustrie sowie anderen energieintensiven Industrien wird eine Vielzahl von verschiedenen Thermoprozessanlagen zur Produktion und Wärmebehandlung von Produkten und Halbzeugen eingesetzt. An vielen Anlagen werden Wärmerückgewinnungssysteme zur Verringerung der Abgaswärmeverluste sowie des Brennstoffbedarfs eingesetzt. Dennoch fallen auch an diesen Anlagen noch Abwärmeströme mit Temperaturen von über 300°C an, die ungenutzt an die Umgebung abgegeben werden. Eine Möglichkeit, diese Abwärme sinnvoll zu nutzen, ist die Verstromung. Hierfür bieten sich je nach vorliegenden Randbedingungen verschiedene Verfahren, wie Dampfturbine, Dampfmotor oder der Organic Rankine Cycle (ORC) an.

Ziel dieses Verbundvorhabens war, am Beispiel eines KMU-Schmiedebetriebs die Nutzbarmachung eines Verfahrens zur Stromerzeugung aus der Abwärme von vier Schmiedeöfen zu demonstrieren.

Zunächst wurden anhand von Betriebsmessungen und der Auswertung vorhandener Daten der nutzbare Abwärmestrom sowie die im Betrieb vorliegenden weiteren Randbedingungen ermittelt. Ergebnis war eine nutzbare Abwärmeleistung der vier Schmiedeöfen von rd. 2.000 kW_{th} bei einer Temperatur von rd. 550°C. Als am besten geeignetes Verstromungsverfahren wurde der ORC-Prozess im Vergleich zu anderen Verfahren ermittelt. Gründe waren der geringere Wartungsaufwand und Aufwand für die erforderliche Peripherie, der bessere Wirkungsgrad im unteren Leistungsbereich, das bessere Teillastverhalten sowie die kurzen Anfahrzeiten.

Begleitend zu den Betriebsmessungen wurde zur sinnvollen Nutzung des Verstromungsverfahrens ein anlagenübergreifendes Ofenbilanzierungssystem entwickelt. Das Programm beinhaltet Prognosefunktionen zum Erdgas- und Stromverbrauch sowie der Abwärmeleistung und dem daraus zu erzeugenden Strom.

Basierend auf den ermittelten technischen Randbedingungen fiel die Wahl auf eine ORC-Anlage der Fa. Bosch KWK Systeme GmbH mit einer elektrischen Leistung von 300 kW beim Betrieb von vier Turbinen. Für die Installation der ORC-Anlage auf dem Werksgelände der Fa. Grimm waren verschiedene Umbaumaßnahmen vorzunehmen, z. B. die Anpassung der Abgasleitungsführung, Installation neuer Abgasgebläse sowie Fundamentarbeiten für den ORC-Container.

Nach der Inbetriebnahme der ORC-Anlage traten erhebliche Störungen auf, die einen kontinuierlichen Betrieb der ORC-Anlage über einen längeren Zeitraum bis Ende 2013 verhinderten. Dadurch konnte ein kontinuierlicher Betrieb der Anlage bis Ende 2013 nicht erreicht werden. Nachdem die Störungen Ende 2013 / Anfang 2014 weitestgehend beseitigt werden konnten, stellte sich ab Anfang 2014 ein weitestgehend kontinuierlicher Betrieb ein. Insgesamt konnte die zeitliche Auslastung der ORC-Anlage von rd. 14 % in 2012 bis auf rd. 50 % in 2014 erhöht werden. Infolgedessen hat sich auch der Stromei-

genverbrauch der Anlage verringert, so dass sich die Nettostromausbeute zusätzlich erhöht hat. Im Jahr 2014 wurde die Anlage bis einschließlich Juli rd. 2.600 Stunden betrieben. In diesem Zeitraum wurde eine Nettostromproduktion von rd. 156.000 kWh erreicht.

Im Projektverlauf haben sich die Unternehmensziele der Fa. Grimm von der Serienfertigung zur Stückauftragsfertigung verschoben, so dass anstatt der geplanten vier baugleichen großen Schmiedeöfen nur drei der Öfen und ein 30-Zentner-Ofen mit deutlich geringerer Leistung an die ORC-Anlage angeschlossen werden konnten. Dadurch kann der ORC-Anlage nicht die Abwärmeleistung zur Verfügung gestellt werden auf die sie ausgelegt wurde. Daraus ergibt sich, dass z. Z. maximal ein Betrieb der ORC-Anlage mit drei der vier Turbinen möglich ist.

Die gesamte Nettostromproduktion bis einschließlich Juli 2014 beläuft sich auf rd. 200.000 kWh mit einer daraus resultierenden CO₂-Einsparung von rd. 120.000 kg. Die zu erwartende Amortisationszeit der ORC-Anlage liegt je nach Strompreis zwischen 7,5 und 19,5 Jahren. Über die gesamte Lebensdauer der ORC-Anlage von anzunehmenden 20 Jahren kann eine CO₂-Ersparnis von rd. 11.400 t erreicht werden. Die Wirtschaftlichkeitsabschätzung hat ergeben, dass bei diskontinuierlichem Betrieb die Amortisationszeit für den ORC-Prozess im Vergleich zu Dampfturbine, Dampfmotor und TEG am geringsten ist. Insgesamt ist jedoch nur in seltenen Fällen bei einer Abwärmeverstromung mit einer heutzutage oft üblichen geforderten Amortisationszeit von unter 4 Jahren zu rechnen. Über die gesamte Lebensdauer einer Verstromungsanlage ist die Wirtschaftlichkeit jedoch zumeist gegeben.

Zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der ORC-Anlage wird es zukünftig die Aufgabe sein, der ORC-Anlage mehr Abwärme zur Verfügung zu stellen. Dies würde sich automatisch mit dem Betrieb aller 4 angeschlossenen Öfen einstellen (was bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt u. a. aufgrund von Ofenumbauten noch nicht der Fall war). Der Betrieb der Öfen hängt jedoch im Wesentlichen von der Auftragslage ab und ist nur begrenzt zu beeinflussen. Der Stromeigenverbrauch der ORC-Anlage kann durch den Austausch einer Speisepumpe im Kältemittelkreislauf durch eine Pumpe mit geringerer Leistung gesenkt werden. Zudem wird z. Z. der Bau eines BHKW durch die Fa. Grimm geprüft. Die Abwärme des BHKW könnte der ORC-Anlage zugeführt werden, so dass sich bei Vollastbetrieb der Schmiedeöfen alle 4 Turbinen der ORC-Anlage betreiben lassen. Zudem würde sich mindestens ein kontinuierlicher Betrieb der ORC-Anlage mit einer Turbine einstellen. Dies würde die Wirtschaftlichkeit je nach Größe des BHKW und der damit zur Verfügung stehenden Abwärme signifikant verbessern.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Formelzeichen und Indizes	
1. Aufgabenstellung	1
2. Voraussetzungen	1
3. Planung und Ablauf des Vorhabens	3
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand von Verstromungsverfahren zu Projektbeginn	5
4.1 ORC-Prozess	6
4.2 Dampfturbine	7
4.3 Dampfmotor	8
4.4 Vergleich der Verstromungsverfahren	10
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	10
6. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	10
6.1 Betriebsmessungen zur Aufnahme des Ist-Zustandes an den Schmiedeöfen der Fa. Grimm	11
6.1.1 Produktionsprozesse bei der Fa. Grimm	11
6.1.2 Ofenbelegungsstrategie	13
6.1.3 Betriebsmessungen an den Schmiedeöfen	13
6.1.4 Ermittlung der Hauptstromverbraucher und Erfassung des Stromverbrauchs	20
6.1.5 Schlussfolgerung aus den Betriebsmessungen	21
6.2 Erstellung eines Ofenbilanzierungsprogramms	22
6.2.1 Energetische Bilanzierung der Schmiedeöfen	23
6.2.2 Bilanzierung und Prognose von Stromproduktion und –bedarf	30
6.2.3 Erstellung einer Ein- und Ausgabeoberfläche für das Ofenbilanzierungssystem	31
6.3 Auswahl, Inbetriebnahme und Betrieb des Abwärmeverstromungsverfahrens	34
6.3.1 Auswahl des Verstromungsverfahrens	35
6.3.2 Technische Daten und Betriebsweise der ORC-Anlage	36
6.3.3 Engineering zur Installation der ORC-Anlage	37

6.3.4	Umbaumaßnahmen zur Installation der ORC-Anlage bei der Fa. Grimm	38
6.3.5	Inbetriebnahme der ORC-Anlage und Langzeituntersuchungen	42
6.3.5.1	Installation der ORC-Anlage bei der Fa. Grimm	42
6.3.5.2	Inbetriebnahme der ORC-Anlage	44
6.3.5.3	Betrieb der ORC-Anlage	48
6.3.5.4	Bewertung des Betriebs der ORC-Anlage	52
6.4	Technisch-wirtschaftliche Bewertung	53
6.4.1	Technisch-wirtschaftliche Bewertung und Klimaschutzaspekte	54
6.4.2	Nutzanwendungskonzepte zur Übertragung auf andere Thermoprozessanlagen	61
7.	Verwertungsplan	62
8.	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens durch andere Stellen	63
9.	Veröffentlichungen zum Forschungsvorhaben	66
10.	Schlussfolgerung und Ausblick	67
	Schrifttum	

Formelzeichen

A	Fläche	m ²
c_p	Spezifische Wärmekapazität	kJ/(kg K)
\dot{E}	Energiestrom	kW
H_u	Unterer Heizwert	kJ/kg
m	Masse	kg
\dot{m}	Massenstrom	kg/s
t	Zeit	s
t'	Spezifische Öffnungszeit	s/t
T	Temperatur	K
α	Wärmeübergangskoeffizient	W/(m ² K)
Δp	Ofenüberdruck	Pa
ε	Emissionskoeffizient	-
σ	Stephan-Boltzmann Konstante	5,67 x 10 ⁻⁸ W/(m ² K ⁴)
φ	Öffnungskoeffizient	-
ρ	Dichte	kg/m ³

Indizes

AG	Abgas
a	außen
BL	Brennluft
EG	Erdgas
i.N.	im Normzustand
OR	Ofenraum
OT	Ofentür
OW	Ofenwand
Ö	Öffnen
SG	Schmiedegut
STB	Sicherheitstemperaturbegrenzer
U	Umgebung
Verl	Verlust

1. Aufgabenstellung

Ziel dieses Verbundvorhabens war, am Beispiel eines KMU-Schmiedebetriebs die Nutzbarmachung eines Verfahrens zur Stromerzeugung aus der Abwärme von vier Schmiedeöfen zu demonstrieren. Schmiedeöfen stellen mit ihren starken Betriebschwankungen für die Abwärmeverstromung eine besondere Herausforderung dar, weil:

- die Ofentüren regelmäßig geöffnet werden, um Schmiedeblocke zu entnehmen oder den Ofen zu bestücken und dadurch die Ofenatmosphäre variiert,
- die Schmiedeblocke unterschiedliche Abmessungen und Werkstoffe sowie verschiedene Verweilzeiten bei individuellen Aufheizbedingungen in den Öfen haben und die Öfen dadurch größtenteils diskontinuierlich betrieben werden und
- in Schmiedebetrieben mehrere Schmiedeöfen zumeist nicht anlagenübergreifend koordiniert betrieben werden.

Daraus ergibt sich, dass der Erdgasbedarf der einzelnen Öfen zeitlich stark variiert. Auch der Gesamtabgasvolumenstrom unterliegt dadurch z. T. starken zeitlichen Veränderungen und erschwert die energetisch sinnvolle Nutzung des Abgasvolumenstroms.

Motivationen und Hauptziele zu dem Forschungsvorhaben waren die Steigerung des Anlagenwirkungsgrades, Senkung des Fremdstrombezuges sowie der CO₂-Emissionen, Erhöhung der Stromversorgungssicherheit und die Ausnutzung vorhandener Abwärmeenergie bei der Gustav Grimm Edelstahlwerk GmbH & Co.KG (Grimm). Durch Verstromung der nach der Brennlufthvorwärmung an die Umgebung abgeleiteten Schmiedeofenabwärme sollte die Verbesserung der Energieeffizienz des gesamten Schmiedeprozesses erreicht werden. Dies schloss die Entwicklung und Integration eines anlagenübergreifenden Ofenbilanzierungssystems zur sinnvollen Nutzung des Verfahrens im Gesamtschmiedeprozess ein. Das Abwärmeverstromungsverfahren sollte als Pilotanlage im Schmiedebetrieb zur Sammlung von Langzeiterfahrungen permanent im Einsatz verbleiben. Es sollten weiterführende Vermarktungsstrategien zur breiten Nutzenanwendung erarbeitet werden. Zudem waren die Ergebnisse kontinuierlich aktiv zu verbreiten.

2. Voraussetzungen

In der Eisen- und Stahlindustrie sowie anderen energieintensiven Branchen wird eine Vielzahl von verschiedenen Thermoprozessanlagen zur Produktion und Wärmebehandlung (um z. B. Werkstoff- und Oberflächeneigenschaften gezielt einzustellen) von Produkten und Halbzeugen eingesetzt. Zumeist werden die Thermoprozessanlagen mit Erdgas befeuert. An vielen Anlagen werden Wärmerückgewinnungssysteme zur Verringerung der Abgaswärmeverluste sowie des Brennstoffbedarfs eingesetzt. Dennoch fal-

len auch an diesen Anlagen noch Abwärmeströme mit Temperaturen von über 300°C an, die ungenutzt an die Umgebung abgegeben werden.

In Feuerungsanlagen der Eisen- und Stahlindustrie, wie z. B. Schmiedeöfen oder Banderwärmungsanlagen, werden die Produktionsgüter und Halbzeuge auf eine vorgegebene Temperatur erwärmt. Die Öfen werden im Temperaturbereich von rd. 700 – 1.300°C betrieben, wodurch Schmiedeblocke formbar gemacht und Werkstoffigenschaften der Blöcke und Bänder gezielt verbessert werden. Zurzeit gibt es in Deutschland rd. 40 Banderwärmungsanlagen und 50 Schmiedebetriebe. Insgesamt befinden sich rd. 500 Schmiedeöfen im Dauereinsatz. **Bild 1** zeigt vier Schmiedeöfen zur Herstellung qualitativ hochwertiger Nutzgüter bei Grimm.



Bild 1: Schmiedeöfen bei der Gustav Grimm Edelstahlwerk GmbH & Co. KG

Zur Wärmerückgewinnung werden überwiegend Rekuperatorsysteme zur Brennluftvorwärmung eingesetzt mit denen bis zu 30 % der Abgaswärme dem Ofen wieder zugeführt werden. Der Rest der Abwärme geht bei einem Temperaturniveau von rd. 300 – 800°C ungenutzt verloren oder wird nur zu einem geringen Anteil, z. B. zur Dampferzeugung, genutzt. Die ungenutzte Abwärme bietet das energetische Potential zur Eigenstromerzeugung. Dies ist ein vielversprechender Weg, der derzeit in der Eisen- und Stahlindustrie nur vereinzelt umgesetzt ist.

Zur Untersuchung und Umsetzung einer Abwärmeverstromung in einem Schmiedebetriebe haben sich Grimm und das VDEH-Betriebsforschungsinstitut (BFI) zu einem Forschungsverbund zusammengefunden. An den Schmiedeöfen von Grimm lag schon die Nutzung eines Teils der Abwärme zur Brennluftvorwärmung in Rekuperatoren vor. Da

die Temperatur der Abwärmeströme nach den Rekuperatoren noch bis zu 550°C betrug, sollte die Restabwärme zur Stromerzeugung genutzt werden.

Die **Gustav Grimm GmbH & Co. KG** ist ein mittelständisches Unternehmen in Remscheid mit rd. 170 Mitarbeitern, das 1878 gegründet wurde. Auf mehreren modernen Schmiedeaggregaten werden hochwertige Freiformschmiedestücke und Stabstahl in Form von Einzelstücken und Kleinserien für anspruchsvolle Aufgaben z. B. in der Luft- und Raumfahrt, Chemie- und Lebensmittelindustrie sowie dem Maschinenbau gefertigt. Neben dem Bereich der Formgebung wird die gesamte Fertigungskette über Wärmebehandlung, Zerspanung bis hin zur Oberflächentechnik abgedeckt.

Die **VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH** ist eines der europaweit führenden Institute für anwendungsnahe Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Stahltechnologie. Das Tätigkeitsfeld des BFI erstreckt sich entlang der kompletten Prozesskette der Stahlherstellung von den Einsatzstoffen zum Endprodukt. Kernkompetenzen sind Messtechnik, Verfahrenstechnik und Prozessautomatisierung. Insgesamt 13 Fachabteilungen aufgeteilt in drei Bereiche - Energie- und Ressourcentechnik, Prozesstechnik und Mess- und Automatisierungstechnik - behandeln kompetenzorientiert die Fragestellungen um den Stahlherstellungsprozess. Dabei steht die werkswerte Optimierung bezüglich Qualität, Ressourcen- und Energieeffizienz, sowie Wirtschaftlichkeit im Vordergrund.

Zusammen verfügen die Projektpartner über umfangreiche Erfahrungen in den für dieses Vorhaben geforderten Fachdisziplinen. So liegen spezielle Erkenntnisse über die Regelung von Industrieöfen, die Messung in Heißgasatmosphären und der Entwicklung sowie betrieblichen Einführung von Managementsystemen vor. Die Fa. Grimm verfügt als Schmiedebetrieb mit langer Tradition über langjährige Betriebserfahrung und vertieftes Wissen in der Schmiedetechnik.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben bestand im Wesentlichen aus folgenden Hauptarbeitspunkten:

1. Betriebsmessungen zur Aufnahme des Ist-Zustandes an den Schmiedeöfen der Fa. Grimm

Es waren sowohl Messungen zur Rauchgaszusammensetzung, Schadstoff- und Staubbeladung als auch zu Volumenströmen (Erdgas, Brennluft, Rauchgas) und Stromverbrauchern durchzuführen. Anhand der Betriebsmessungen konnten Randbedingungen zur Auswahl und zum Betrieb eines Abwärmeverstromungsverfahrens ermittelt werden.

2. Erstellung eines Ofenbilanzierungsprogramms

Zur Optimierung des Betriebs des Verstromungsverfahrens wurde ein Ofenbilanzierungsprogramm entwickelt, das eine abschätzende Vorhersage der anfallenden Abwärme, erforderlicher Energieströme sowie des Strombedarfs und der Stromproduktion des Verstromungsverfahrens ermöglicht.

3. Auswahl, Inbetriebnahme und Betrieb des Abwärmeverstromungsverfahrens

Anhand der ermittelten Randbedingungen war das am besten geeignete Verstromungsverfahren zur Nutzung der ungenutzten Abwärme aus Schmiedeöfen auszuwählen und auszulegen. Es wurde eine ORC-Anlage ausgewählt, installiert und in Betrieb genommen. Betriebserfahrungen wurden gesammelt.

4. Technisch-wirtschaftliche Bewertung

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse aus dem Betrieb der ORC-Anlage war der neue Anlagenverbund technisch-wirtschaftlich zu bewerten. Zudem sollten Anwendungskonzepte für eine weitere Verbreitung der Technologie in der Eisen- und Stahlindustrie als auch branchenübergreifend entwickelt werden.

Insgesamt ergab sich aus den o. g. Hauptarbeitspunkten folgender Arbeitsplan:

Tabelle 1: Arbeitsplan des Forschungsprojekts

	Arbeitsschritt
1.	Detaillierte Erfassung, Auswertung und Bewertung der aktuellen Betriebsbedingungen und der Energieströme im Schmiedebetrieb.
2.	Entwicklung eines Ofenmanagementsystems auf Basis der aktuellen und zukünftigen Ofenbelegung.
3.	Entwicklung eines anlagenübergreifenden Strommanagementsystems mit Ausgabe des aktuellen und zukünftigen Strombedarfs.
4.	Entwicklung von übergeordneten Optimierungsstrategien im Hinblick auf Berechnung des optimalen Betriebspunktes für Gesamtenergieeinsparung, Produktivität, Wirtschaftlichkeit, Produktqualität und maximale Stromerzeugung.
5.	Implementierung der Managementsysteme mit Visualisierungs- und Berechnungsfunktionen.
6.	Betriebliche Umsetzung, Durchführung von systematischen Tests und kontinuierliche Optimierung der Managementsysteme.
7.	Detailbewertung und Auswahl geeigneter Stromerzeugungsverfahren, wie z. B. ORC-Anlagen und Dampfmotor, und Adaption des am besten geeigneten Verfahrens an die Betriebsbedingungen im Schmiedebetrieb.
8.	Entwicklung und betriebliche Umsetzung einer Abgasführung/-regelung, mit Beherrschung von kritischen Betriebszuständen, zur optimalen Einbindung der Niedertemperaturabwärme in das Verfahren zur Stromerzeugung.
9.	Erarbeitung von Regelungsstrukturen und baulichen Veränderungen zum optimalen Betrieb des Verfahrens unter den rauen Bedingungen im Schmiedebetrieb.

Tabelle 1: Arbeitsplan des Forschungsprojekts (Fortsetzung)

	Arbeitsschritt
10.	Bau sowie betriebliche Umsetzung des modifizierten Verfahrens in Form einer Pilotanlage und Integration in den Gesamtschmiedeprozess.
11.	Durchführung von systematischen Tests und Langzeituntersuchungen zur Optimierung der Pilotanlage.
12.	Technisch-wirtschaftliche Bewertung des Gesamtsystems.
13.	Entwicklung von Anwendungskonzepten zum erweiterten Einsatz des Gesamtsystems unter besonderer Berücksichtigung der Eisen- und Stahlindustrie.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand von Verstromungsverfahren zu Projektbeginn

Zur Abwärmenutzung an Feuerungsanlagen der produzierenden und verarbeitenden Industrie können abhängig von den spezifischen Rahmenbedingungen (Abgasvolumenstrom, Temperaturniveau, Abgaszusammensetzung, ...) verschiedene Verfahren nutzbar gemacht werden. Sowohl technisch als auch wirtschaftlich, gilt im Allgemeinen folgende Reihenfolge [1], [2]:

1. Vermeidung/Verminderung der Abwärme durch z. B. Wärmedämmung oder angepasste Prozessführung.
2. Rückführung der Abwärme in den Prozess durch z. B. Brennluftvorwärmung oder Vorwärmung/Trocknung der Ausgangsstoffe.
3. Betriebsinterne Verwendung der Abwärme z. B. zur Gebäudebeheizung oder Verwendung in anderen Prozessen.
4. Umwandlung der Abwärme in andere Energieformen wie z. B. Strom oder Kälte.
5. Externe Verwendung der Abwärme z. B. in Fernwärmenetzen oder in anderen Unternehmen als Prozess- oder Heizwärme.

Die Punkte 1 bis 3 sind in den Betrieben häufig schon umgesetzt und weitestgehend Stand der Technik. Trotz dieser häufig bereits umgesetzten Abwärmenutzung, fallen in der Eisen- und Stahlindustrie immer noch Abwärmeströme mit bis zu 800°C an, z. B. nach Rekuperatorsystemen zur Brennluftvorwärmung. Die Wirtschaftlichkeit einer Abwärmeverstromung wird maßgeblich vom Temperaturniveau und der Leistung des Abwärmestroms, von den Betriebsstunden der Anlage sowie von den Kosten für die zur Verfügung stehenden Abwärme bestimmt. Für die o. g. Abwärmepotentiale kann die Verstromung ein effizienter und wirtschaftlicher Weg zur Nutzung sein. Im Folgenden werden der Organic Rankine Cycle (ORC), die Dampfturbine und der Dampfmotor näher betrachtet. Die Nutzung industrieller Abwärme mittels Stirlingmotoren ist möglich, jedoch

nicht für großtechnische Anwendungen dokumentiert, da die elektrische Leistung der Stirlingmotoren im unteren zweistelligen kW-Bereich zu gering für diese Anwendungen ist. Der Kalina-Prozess ist eine Variante des ORC-Prozesses und kaum verbreitet, da anlagentechnisch komplexer und somit kapitalintensiver [3]. Die Nutzung thermoelektrischer Generatoren (TEG) zur industriellen Abwärmenutzung war zu Beginn des Forschungsvorhabens noch nicht hinreichend weit entwickelt und wurde daher nicht weiter betrachtet.

4.1 ORC-Prozess

Der ORC-Prozess ist ein geschlossener Kreisprozess zum Betrieb von Dampfturbinen. Als Arbeitsmittel werden organische Flüssigkeiten mit niedrigem Siedepunkt verwendet, wie z. B. verschiedene Kältemittel oder Pentan. Für die optimale Betriebsweise einer ORC-Anlage sind u. a. die richtige Wahl des Arbeitsmittels, die Abwärmemetemperatur sowie die Arbeitsmitteltemperatur am Turbineneingang von großer Bedeutung. **Bild 2** zeigt das Schema eines ORC-Prozesses mit Thermoölkreislauf. Dem Thermoölkreislauf wird über den Wärmeübertrager Wärme zugeführt. Im Vorwärmer wird das unter Druck stehende Arbeitsmedium vorgewärmt und anschließend verdampft sowie überhitzt. In der Turbine wird das Arbeitsmedium unter Verrichtung von Arbeit wieder entspannt und anschließend im Kondensator unter Abgabe von Wärme verflüssigt. Die Speisepumpe erhöht wieder den Druck des flüssigen Arbeitsmediums und befördert es in den Vorwärmer.

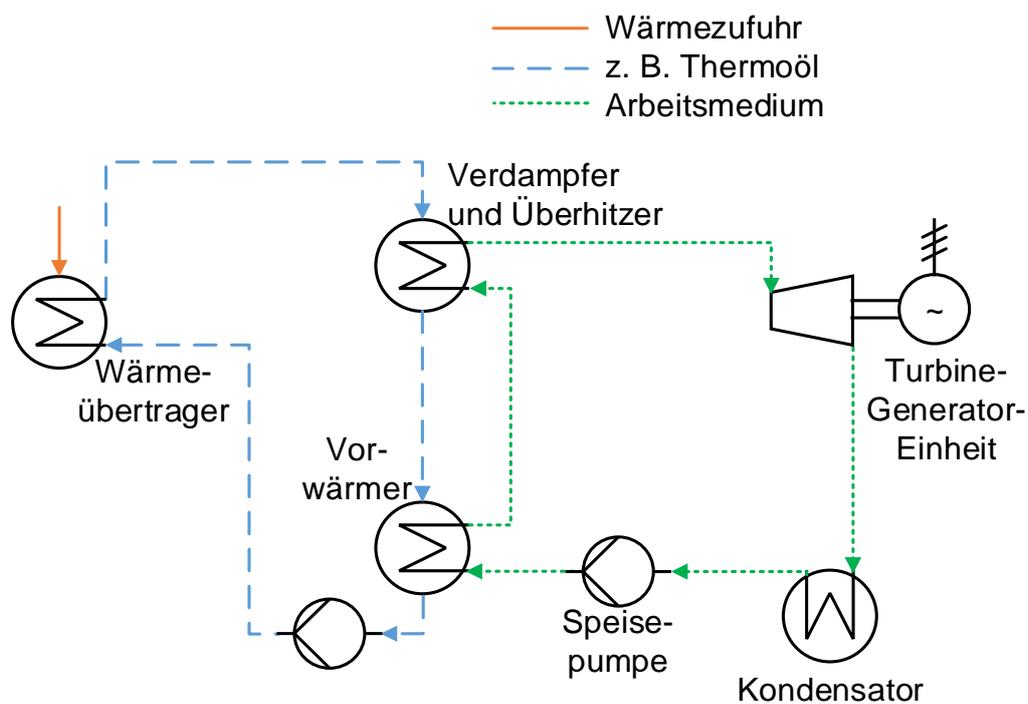


Bild 2: Prinzipschema des ORC-Prozesses

Der ORC-Prozess kann für Temperaturbereiche ab 70°C eingesetzt werden. Haupteinsatzgebiet von ORC-Anlagen ist z. Z. die Stromerzeugung mittels geothermischer Heißquellen oder die Nutzung der Abwärme von Biomassekraftwerken oder Biogasmotoren. In Deutschland werden hierzu ORC-Pilotanlagen z. B. in Neustadt-Glewe [4] und Landau [5] betrieben. Weiterhin wurde der Einsatz in einer Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungsanlage in Admont (Österreich) untersucht [6]. Der Einsatz des ORC-Prozesses zur Stromerzeugung aus Niedertemperaturabwärme in der Industrie ist für das Zementwerk Lengfurt dokumentiert [7]. Eine Studie zum Einsatz von ORC-Anlagen zur Abwärmenutzung in der Industrie kommt zu dem Schluss, dass rd. 500 Betriebe in Betracht kommen in denen rd. 50 – 100 ORC-Systeme realisiert werden könnten [8]. ORC-Anlagen sind zumeist in einem Leistungsspektrum von rd. 35 kW_{el} bis 1,5 MW_{el} erhältlich. Aufgrund ihres modularen Aufbaus können mehrere ORC-Anlagen parallel geschaltet und so auch größere Abwärmeströme genutzt werden. Der elektrische Wirkungsgrad von ORC-Anlagen liegt üblicherweise zwischen 10 und 20 %. Das Teillastverhalten ist sehr gut, es ist ein Betrieb zwischen 15 und 100 % der thermischen Nennlast möglich [8]. Die Anfahrzeit der ORC-Anlage beträgt nur wenige Minuten.

Die spezifischen Investitionskosten nur für die ORC-Anlage belaufen sich auf rd. 1.500 bis 3.000 €/kW_{el}. Durch die erforderliche Peripherie, wie Verrohrung, Wärmeübertrager und elektrischer Anschluss an das Werksnetz können spezifische Investitionskosten von über 4.000 €/kW_{el} entstehen. Die Betriebs- und Wartungskosten sind wegen der geringen Störungsanfälligkeit, der hohen Zuverlässigkeit und keiner Arbeitsmittelverluste, durch den geschlossenen Kreisprozess, gering. Durch die Möglichkeit der vollautomatischen Regelung beschränkt sich der Personalbedarf auf die regelmäßigen Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten [6], [8].

4.2 Dampfturbine

Die Dampfturbine ist eine Wärmekraftmaschine mit rotierenden Laufteilen. Als stetig strömendes Arbeitsmittel wird Wasserdampf eingesetzt. Eine gesamte Dampfturbinenanlage, bestehend aus der Dampfturbine mit angetriebener Arbeitsmaschine (inkl. Getriebe), Kondensationsanlage, Rohrleitungen und weiteren Hilfseinrichtungen, arbeitet prinzipiell nach dem Dampfkraftprozess. Die notwendige Wärme zur Verdampfung des Wassers im Dampferzeuger kann u. a. durch Feuerungen (Erdgas, Kohle, Erdöl, Biomasse, ...), Solarenergie, Kernenergie oder Abwärme bereitgestellt werden. In **Bild 3** ist das Prinzip des Dampfkraftprozesses dargestellt. Im Kessel und Überhitzer wird das unter hohem Druck stehende Wasser erwärmt, verdampft und überhitzt. In der Turbine wird das Wasser unter Verrichtung von Arbeit entspannt und anschließend im Konden-

sator unter Wärmeabgabe verflüssigt. Die Speisepumpe bringt das Wasser wieder auf Kesseldruck und befördert es in den Kessel.

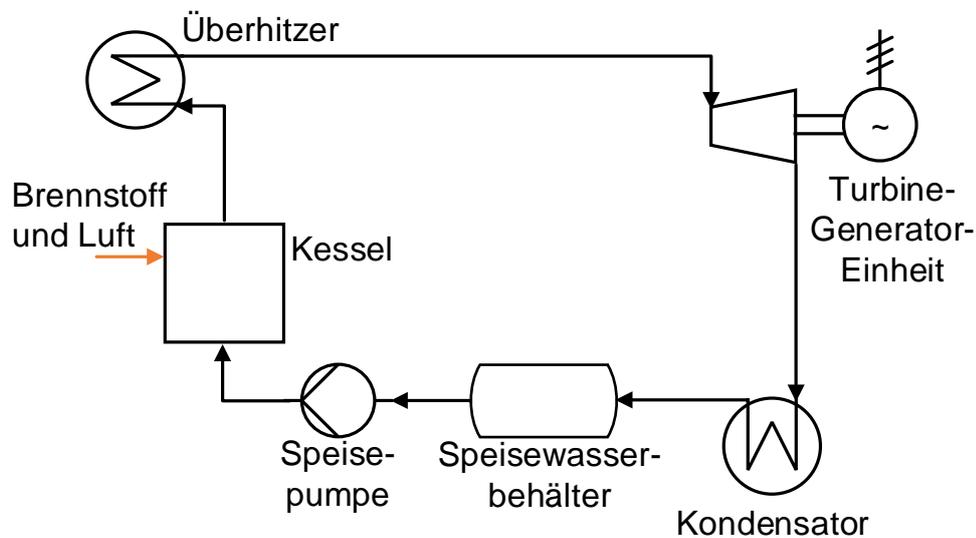


Bild 3: Prinzipschema des Dampfkraftprozesses mit einer Dampfturbine

Haupteinsatzgebiet von Dampfturbinen sind Kraftwerke. Ein Anwendungsgebiet von Dampfturbinen ist die Abwärmenutzung an großen Drehrohröfen der Zementindustrie [9], [10]. Das Leistungsspektrum von Dampfturbinen erstreckt sich von rd. 45 kW_{el} bis zu mehreren hundert MW_{el}. Der elektrische Wirkungsgrad beträgt je nach Art und Größe der Anlage sowie der Anwendung rd. 10 bis 40 %. Im Teillastbetrieb sind je nach Art der Dampfturbine noch rd. 75 % des elektrischen Wirkungsgrades bei Nennlast möglich. Zusätzlich ist die Dampfqualität von hoher Relevanz, da Dampfturbinen, die mit überhitztem Dampf arbeiten deutlich höhere Wirkungsgrade aufweisen als Sattdampfturbinen [11]. Die Anfahrzeit einer Dampfturbine beträgt in der Regel über einer Stunde und erfordert auf Grund des komplexen Anfahrprozesses geschultes Personal.

Die spezifischen Investitionskosten nur für die Dampfturbine liegen je nach Leistung und Bauart bei rd. 1.100 - 1.800 €/kW_{el}. Wichtige zusätzliche Anlagen, die zum Betrieb erforderlich sind: u. a. Verrohrung, Dampferzeuger, Entsalzungsanlage, Speisewassertank, Kondensator und der elektrische Anschluss an das Werksnetz. Dadurch steigen die spezifischen Kosten insbesondere bei Dampfturbinen kleinerer Leistung z. T. stark an und können über 3.000 €/kW liegen. Die Betriebs- und Wartungskosten sind aufgrund des unter hohem Druck stehenden Dampferzeugers und dem erforderlichen spezialisiertem Personal hoch [1], [12].

4.3 Dampfmotor

Der Dampfmotor ist eine Weiterentwicklung der Dampfmaschine bzw. eine einfach oder doppelte wirkende Dampfmaschine mit Ventilsteuerung. Das Wasser zirkuliert im Dampfmotor in einem geschlossenen Kreislauf, der im Wesentlichen aus den Verfah-

rensstufen eines Dampfkraftprozesses besteht, vgl. auch **Bild 4**, jedoch wird der Generator nicht über eine Turbine sondern einen Dampfmotor angetrieben.

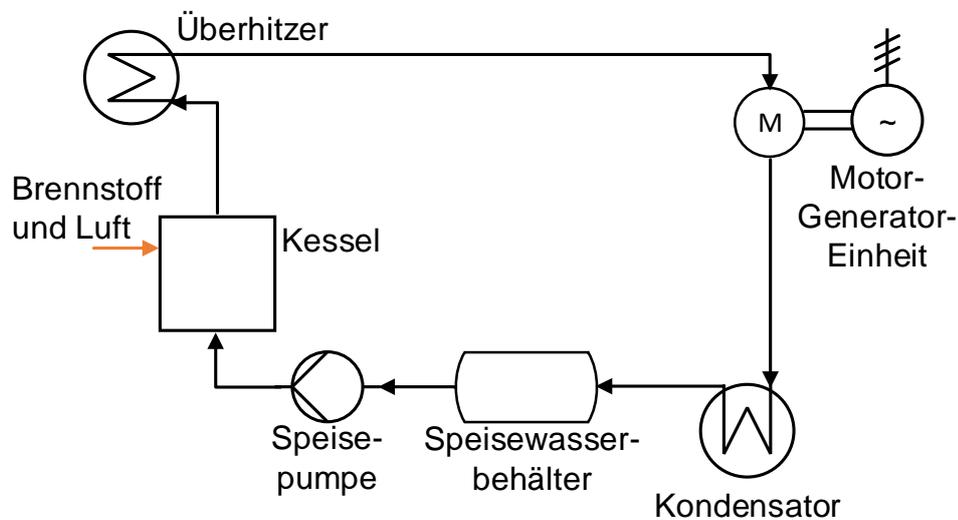


Bild 4: Prinzipschema des Dampfkraftprozesses mit einem Dampfmotor

Dampfmotoren haben ein breites Anwendungsfeld, da eine Vielzahl von Wärmequellen zur Dampferzeugung erschlossen werden kann, z. B. Verbrennung fossiler oder biogener Brennstoffe [13], direkte Solareinstrahlung [14] oder Abwärme. Das Leistungsspektrum liegt zwischen 20 und 3.000 kW_{el}. Haupteinsatzgebiet von Dampfmotoren ist derzeit die Verwendung in BHKW's, z. B. in der Holzindustrie [15], [16]. Industrielle Abwärmernutzung mit Dampfmotoren ist in Deutschland nicht weit verbreitet. Münsterland Energy betreibt einen Dampfmotor mit einer Leistung von 475 kW_{el} mit der Abwärme von Pflanzenölmotoren [16]. Der elektrische Wirkungsgrad liegt zwischen 6 und 20 %. Das Teillastverhalten von Dampfmotoren ist sehr gut, der Betrieb ist zwischen 15 und 100 % der thermischen Nennlast möglich. Die Anfahrzeit von Dampfmotoren beträgt nur wenige Minuten.

Die spezifischen Investitionskosten nur für den Dampfmotor belaufen sich je nach Leistung und Bauart auf rd. 1.100 - 1.600 €/kW_{el}. Wichtige zusätzliche Anlagen, die zum Betrieb eines Dampfmotors erforderlich sind, wie die Verrohrung, Dampferzeuger, evtl. Entsalzungsanlage, Speisewassertank, Kondensator und der elektrische Anschluss an das Werksnetz, erhöhen die spezifischen Kosten insbesondere bei Dampfmotoren kleinerer Leistung z. T. maßgeblich. Dadurch können sich Investitionskosten von über 3.000 €/kW ergeben. Die Betriebs- und Wartungskosten sind aufgrund des unter hohem Druck stehenden Dampferzeugers relativ hoch [1], [12].

4.4 Vergleich der Verstromungsverfahren

In **Tabelle 2** sind die wichtigsten Daten der Verstromungsverfahren zusammengefasst.

Tabelle 2: Daten der betrachteten Verstromungsverfahren [1], [12]

	ORC	Dampfturbine	Dampfmotor
Invest	1.500 – 3.000 €/kW _{el} + Peripherie	1.100 – 1.800 €/kW _{el} + Peripherie	1.100 – 1.600 €/kW _{el} + Peripherie
Peripherie	Verrohrung, Wärmeübertrager, elektrischer Anschluss an das Werksnetz	Verrohrung, Dampferzeuger, evtl. Entsalzungsanlage, Speisewassertank, Kondensator, elektrischer Anschluss an das Werksnetz	Verrohrung, Dampferzeuger, Entsalzungsanlage, Speisewassertank, Kondensator, elektrischer Anschluss an das Werksnetz
Leistungsklassen	35 kW – 1,5 MW	45 kW – 160 MW	20 kW – 3 MW
Temperaturniveau	70 – 500°C	250 – 540°C	250 – 540°C
Wirkungsgrad	10 – 20 %	10 – 42 %	6 – 20 %
Wartungsaufwand	mittel	Sehr hoch, spezialisiertes Personal erforderlich	hoch
Teillastverhalten	Bei halber Last max. 90 % vom Wirkungsgrad, bei Viertellast max. 70 %	Bei halber Last max. 75 % vom Wirkungsgrad	Bei halber Last max. 90 % vom Wirkungsgrad
Betriebsverhalten	Diskontinuierlicher Betrieb möglich, Anfahrzeit wenige Minuten	Möglichst kontinuierlicher Betrieb erforderlich, Anfahrzeit meist über 1 Stunde	Diskontinuierlicher Betrieb möglich, Anfahrzeit wenige Minuten

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Vorhaben wurde von Grimm und dem BFI durchgeführt. Mit der Bosch KWK Systeme GmbH, als Vertreiber der ORC-Anlage, ergab sich eine intensive Zusammenarbeit vor allem während der Integration der ORC-Anlage in die Prozesskette bei Grimm und der Inbetriebnahme, bei der es einige Herausforderungen zu bewältigen gab (siehe auch Kap. 6.3.5). Weitere Stellen z. B. Anlagenbauer wurden als Lieferanten für erforderliche Systemkomponenten hinzugezogen, lieferten jedoch keinen weiterführenden inhaltlichen Input zu dem Vorhaben.

6. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

In den folgenden Unterkapiteln werden die durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse detailliert dargestellt. Als Einführung in die Unterkapitel 6.1 bis 6.4 (entsprechend den

Hauptarbeitspunkten aus Kap. 3) werden kurz die Ziele, die durchgeführten Arbeiten sowie die erzielten Ergebnisse tabellarisch dargestellt.

6.1 Betriebsmessungen zur Aufnahme des Ist-Zustandes an den Schmiedeöfen der Fa. Grimm

Als Grundlage zur Auswahl eines geeigneten Verstromungsverfahrens wurden Betriebsmessungen an den Schmiedeöfen von Grimm durchgeführt, um qualitative und quantitative Aussagen über den Abwärmestrom machen zu können sowie weitere Randbedingungen zu ermitteln, siehe **Tabelle 3**.

Tabelle 3: Übersicht der Arbeiten und Ergebnisse zu den Betriebsmessungen

Zugehörige Arbeitsschritte AS 1
<p>Ziele</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ermittlung der Abwärmeströme und Abgaszusammensetzung sowie Schadstoffbelastung • Ermittlung erforderlicher Randbedingungen zum Einsatz des Stromerzeugungsverfahrens
<p>Durchgeführte Arbeiten</p> <ul style="list-style-type: none"> • Betriebsmessungen zu Abgastemperatur, -zusammensetzung, Staub und SO₂-Gehalt • Betriebsmessungen zu Erdgasverbrauch, Brennluftstrom, Abwärmestrom • Aufnahme des Ist-Zustandes der Ofenbelegungsstrategie und –fahrweise. • Messtechnische Erfassung des Stromverbrauchs der größten Stromverbraucher • Aus- und Bewertung der Betriebsmessungen
<p>Ergebnisse</p> <ul style="list-style-type: none"> • Abgaszusammensetzung und Staubgehalt für Abwärmenutzung durch Verstromungsverfahren geeignet • Abwärmeleistung durch Belegung der Öfen und Aufheizprogramme stark diskontinuierlich • Maximale Abgastemperatur 550 °C • Abwärmeleistung maximal rd. 2.800 kW_{th} bei Volllast aller Öfen • Zu berücksichtigende max. Abwärmeleistung rd. 2.100 kW_{th}, da nicht alle Öfen gleichzeitig im Volllastbetrieb sind

6.1.1 Produktionsprozesse bei der Fa. Grimm

Die Fa. Grimm verfügt in der Freiformschmiede zur Umformung des Materials über insgesamt drei Schmiedeaggregaten: Je eine 16 und 8 MN hydraulische Freiformschmiedepresse sowie ein 30 Zentner Schmiedehammer. Das Fertigungsprogramm reicht von einem Stückgewicht von 50 kg bis zu 10.500 kg. Zur Erwärmung des Schmiedeguts auf die erforderliche Schmiedetemperatur von rd. 1.200°C stehen 3 große Schmiedeöfen und ein 30-Zentnerofen zur Verfügung, die je nach Produktionsplanung und kurzfristigen

Erfordernissen (z. B. Wiedererwärmung während des Schmiedeprozesses) bestückt werden.

Fertig geschmiedete Werkstücke können durch Fräsen, Tieflochbohren, 3D CNC Bearbeitung auf diversen Bearbeitungszentren sowie Schleifen bearbeitet werden. Zur Wärme- und Oberflächenbehandlung von Werkstücken stehen insgesamt 18 Öfen für Glühprozesse und 21 Öfen zum Nitrieren und Oxidieren zur Verfügung. Einen weiteren wichtigen Bestandteil der Oberflächentechnik stellt die Präzisionsrichtmaschine dar in der Werkstücke bis zu einem Maximalgewicht von 10 t warm oder kalt gerichtet werden können.

Zur Verstromung der Abgaswärme wurden aufgrund ihrer Leistung und räumlichen Nähe zu Projektbeginn die vier Schmiedeöfen 1, 2, 3 und 4 (siehe auch Bild 1) ausgewählt. Die maximale Ofenraumtemperatur beträgt rd. 1.200°C. Im späteren Projektverlauf hat sich durch Änderung der Unternehmensziele der Fa. Grimm (von der Serienfertigung zur Stückauftragsfertigung) jedoch ergeben, dass nur 3 baugleiche Öfen (Öfen 1, 3 und 4) und Ofen 13 (siehe **Bild 5**) mit deutlich geringerer Leistung an das Abwärmeverstromungsverfahren angeschlossen werden konnten (siehe auch kap. 6.3). Dies war zum Zeitpunkt der Betriebsmessungen und der Auslegung des Verstromungsverfahrens jedoch noch nicht absehbar.



Bild 5: Ofen 13 bei Grimm

6.1.2 Ofenbelegungsstrategie

Zunächst wurde die Ofenbelegungsstrategie mit Informationen zu Aufheizzeiten, Temperaturniveaus, Tonnage und Aufheizprogrammen aufgenommen. Die Öfen werden im Normalfall in drei Stufen bis zur Schmiedetemperatur von rd. 1.200°C aufgeheizt. Während des Aufheizvorgangs wird die Temperatur auf verschiedenen Niveaus zwischenzeitlich mehrere Stunden gehalten. Nach der Aufheizphase werden die Öfen je nach Anforderungen beheizt, jedoch mindestens auf einer Minimaltemperatur von über 600°C gehalten. Das Nutzgut kann sowohl kalt als auch warm eingebracht und auf Schmiedetemperatur erwärmt werden, wobei der Warmeinsatz direkt aus einem Stahlwerk seltener ist. Das Gewicht der Blöcke variiert zwischen wenigen hundert kg bis über 10 t. Die Belegung der Öfen erfolgt aufgrund der weitestgehenden Stückauftragsfertigung durch eine kurzfristige Planung. Weitere Faktoren bei der Ofenbelegung sind die Größe des Nutzguts und die Anforderungen des Materials an den Schmiedeprozess. Fertige Schmiedestücke werden nach dem Schmieden je nach Anforderungen abgeschreckt, an Luft gekühlt oder wärmebehandelt.

6.1.3 Betriebsmessungen an den Schmiedeöfen

Im Abgaskanal der o. g. Schmiedeöfen wurden über einen Zeitraum von mehreren Wochen Betriebsmessungen durchgeführt. Ziel war die detaillierte Erfassung und Bewertung der Abgaszusammensetzung, Ofenfahrweise und des Energieinhaltes des Abgases, als Grundlage zur Auslegung und Optimierung der Verstromungsanlage. Aufgrund von Umbaumaßnahmen an den Schmiedeöfen und produktionsbedingten Stillständen konnte zumeist nur an einzelnen Schmiedeöfen gemessen werden, so dass Daten für den Betrieb aller 4 Schmiedeöfen aus Berechnungen anhand der Einzelmessungen gewonnen werden mussten.

Es wurden Messvorrichtungen für die Ermittlung der Abgaszusammensetzung, -temperatur und -druck (zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit) installiert. Zur fehlerfreien Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeit wurden die Temperatur- und Druckmessung parallel installiert und anschließend die Messvorrichtung für die Bestimmung der Abgaszusammensetzung. In **Bild 6** sind die Probennahmestelle, das Messwerterfassungssystem und der Analysator an den Schmiedeöfen bei Grimm dargestellt.

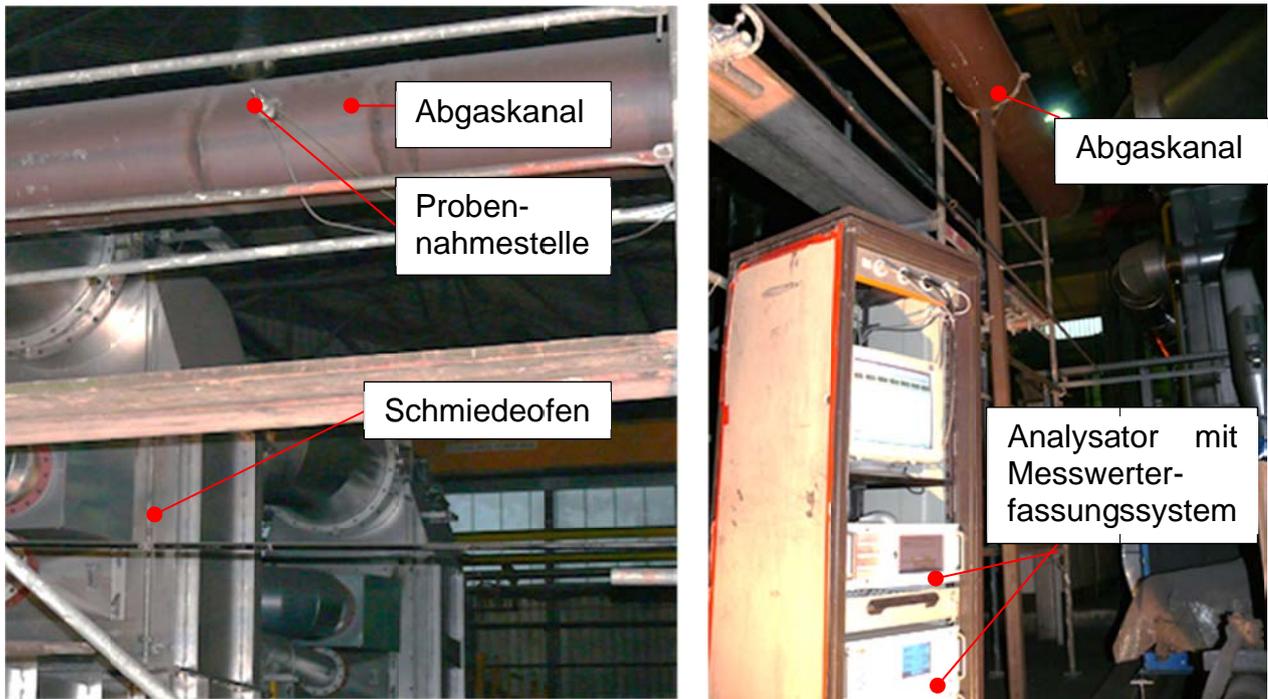


Bild 6: Probenahmestelle im Abgaskanal der Schmiedeöfen 3 und 4 (links) sowie Analysator mit Messwerterfassungssystem (rechts)

Bei einem Stillstand des Schmiedeofens 4 wurde die Erdgas- und Brennluftvolumenstrommessung installiert, **Bild 7**.

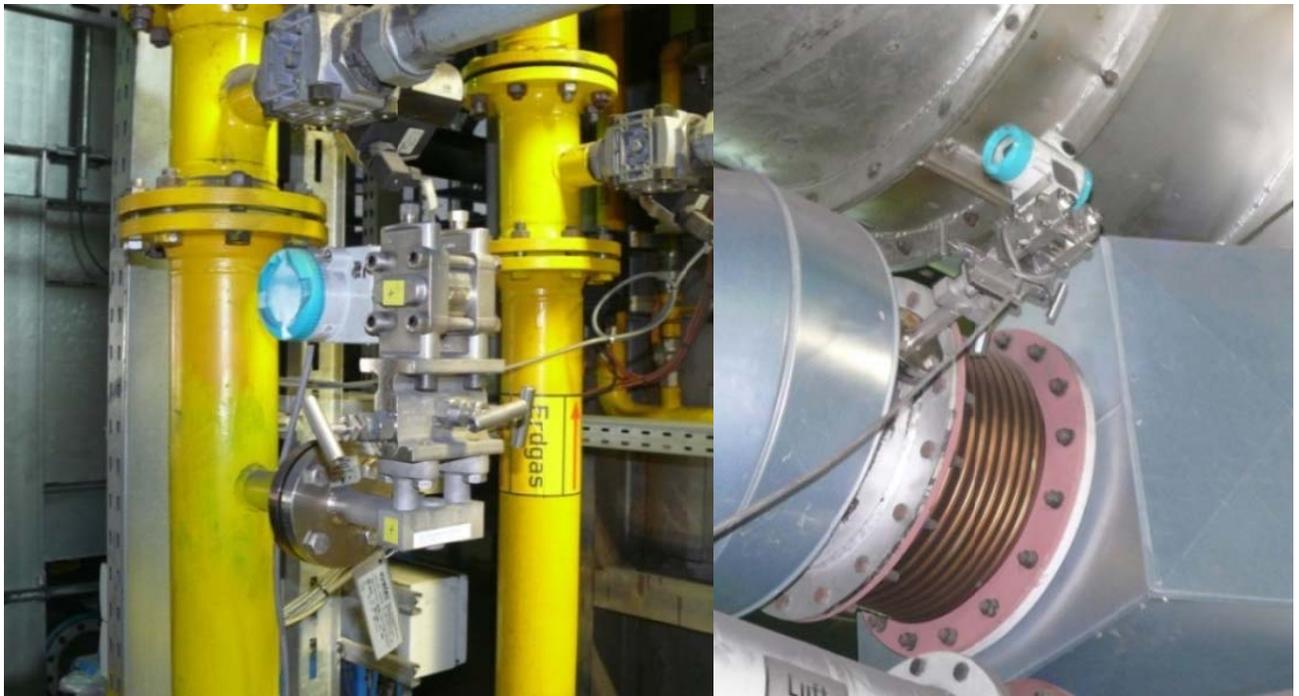


Bild 7: Erdgasvolumenstrommessung (links) und Brennluftvolumenstrommessung (rechts) am Schmiedeofen 4

Bild 8 zeigt beispielhaft die Abgaszusammensetzung für einen Zeitraum von 3 Tagen Anfang 2010. Es sind die Konzentration von O_2 und CO_2 in Vol.-% sowie von CO und NO_x in mg/m^3 aufgetragen. Der Bezugssauerstoff im Abgas für den CO und NO_x -Gehalt

ist 5 Vol.-%. Der CO-Gehalt im Abgas ist nur zu Beginn des Aufheizens des Ofens erhöht. Ansonsten liegt der CO-Gehalt nahe 0 mg/m³. Daher kann von einem guten Ausbrand des Brenngases ausgegangen werden. Die erhöhte O₂-Konzentration ist auf die Zugabe von Kühlluft in das Abgas vor dem Rekuperator zurückzuführen, da der Rekuperator für eine maximale Temperatur von 850°C ausgelegt ist. Der CO₂-Gehalt liegt bei 3 Vol.-% und ändert sich gegenläufig zum Verlauf des O₂-Gehaltes beim Öffnen der Ofentür. Der NO_x-Gehalt stabilisiert sich während des Haltebetriebs bei rd. 300 mg/m³.

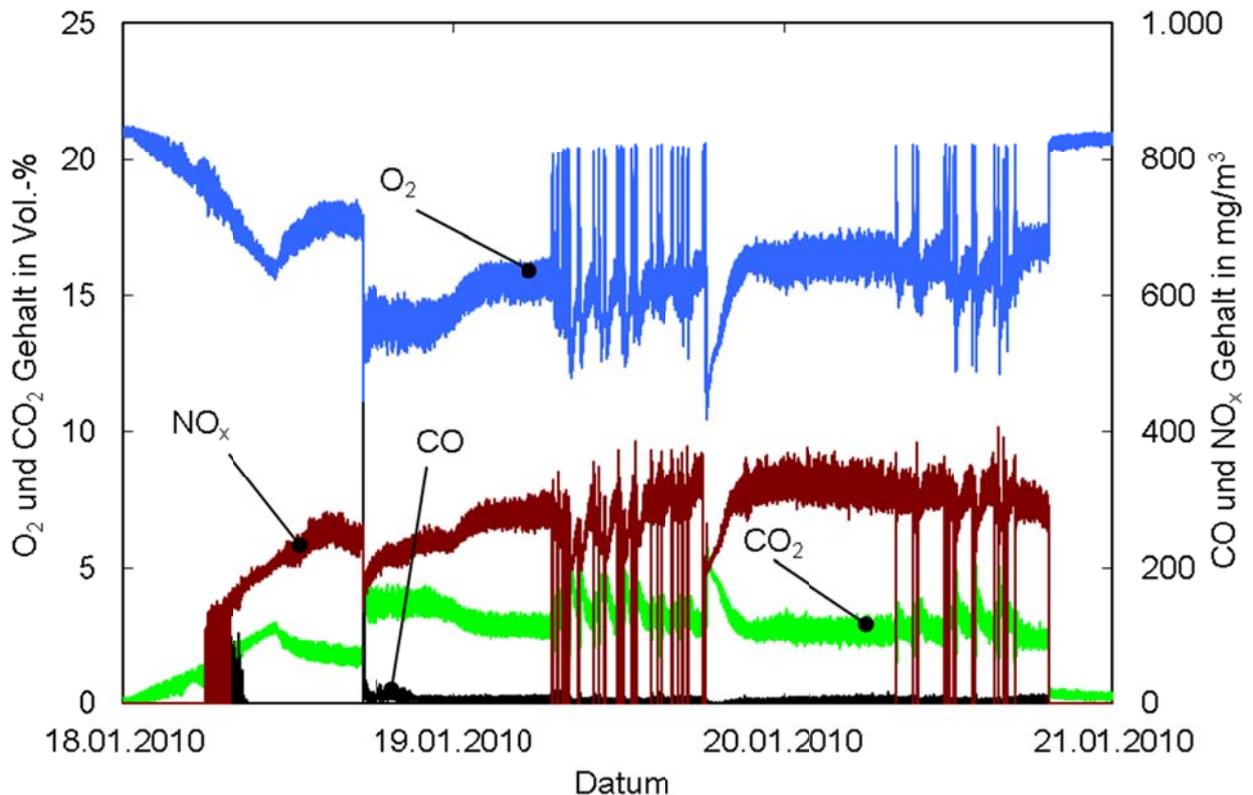


Bild 8: Abgaszusammensetzung der Schmelzöfen bei Grimm vom 18.-20.01.2010

In **Bild 9** sind beispielhaft für die Woche vom 07. bis 13.08.2010 die Abgaszusammensetzung und Temperatur des Abgases nach dem Rekuperator dargestellt. An Hand der Temperaturkurve zeigt sich, dass die Öfen am 07.08. aufgeheizt und bis zum 12.08. kontinuierlich betrieben wurden. Aus dem O₂-Gehalt sind Veränderungen in der Feuerungsleistung zu erkennen. Kurzfristige Anstiege im O₂-Gehalt des Abgases deuten auf die Öffnung der Ofentür hin. Um evtl. schädliche Auswirkungen des Abgases auf den Wärmeübertrager der Verstromungsanlage, z. B. durch Korrosion oder „Zusetzen“ des Wärmeübertragers, frühzeitig zu erkennen und entsprechende Gegenmaßnahmen einleiten zu können, wurden auch der SO₂-Gehalt im Abgas sowie die Staubzusammensetzung gemessen. Der SO₂-Gehalt des Abgases liegt während des Ofenbetriebs zwischen 5 und 10 ppm. Über den Zeitraum von 6 Wochen lag der SO₂-Gehalt bei maximal 30 ppm und im Mittel bei rd. 10 ppm.

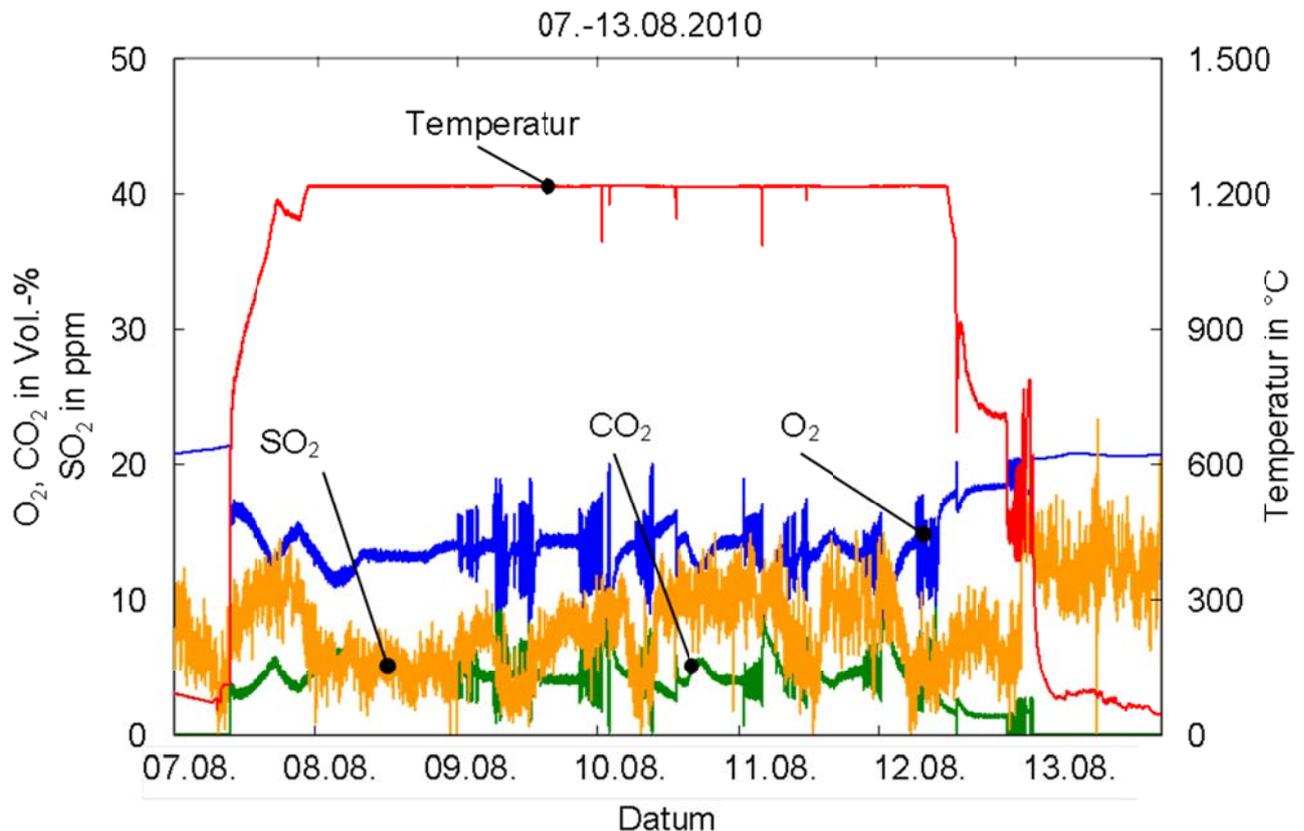


Bild 9: Abgastemperatur und -zusammensetzung der Schmiedeöfen bei Grimm in der Woche vom 07.-13.08.2010

Es wurde eine absaugende Staubentnahme vorgenommen. Hierfür wurde ein Filter kontinuierlich und definiert mit Abgas beaufschlagt. Anschließend wurde der Staub auf seine Bestandteile analysiert, um z. B. mögliche korrosive Bestandteile des Staubes zu identifizieren. In **Tabelle 4** sind die Ergebnisse einer chemischen Analyse des Abgassstaubes zusammengefasst.

Tabelle 4: Ergebnis der chemischen Analyse des Staubes

Komponente	Gehalt	Komponente	Gehalt
Mn:	0,029 %	Sb:	95 ppm
Cr:	0,48 %	Hg:	< 0,3 ppm
Ni:	0,16 %	Te:	0,43 %
Cu:	1,02 %	Fluorid:	0,81 %
Pb:	0,014 %	Cyanid:	0,004 %
Sn:	0,005 %	Se:	< 10 ppm
V:	0,043 %	Tl:	< 0,5 ppm
Co:	0,008 %	Rest:	unbestimmte Bestandteile

Ergebnis der Messungen des Schmiedeofenrauchgases war, dass sich aus dem SO₂-Gehalt des Abgases und der Staubzusammensetzung keine erhöhte Schädigungsgefahr der nachgeschalteten Verstromungsanlage oder deren Wärmeübertrager ergibt.

Bild 10 zeigt den Temperaturverlauf des Ofenabgases nach dem Rekuperator im November 2009. Es zeigt sich die diskontinuierliche Fahrweise der Öfen mit Stillständen vor allem an Wochenenden. Die Temperatur des Abgases liegt zwischen rd. 550 und 450°C.

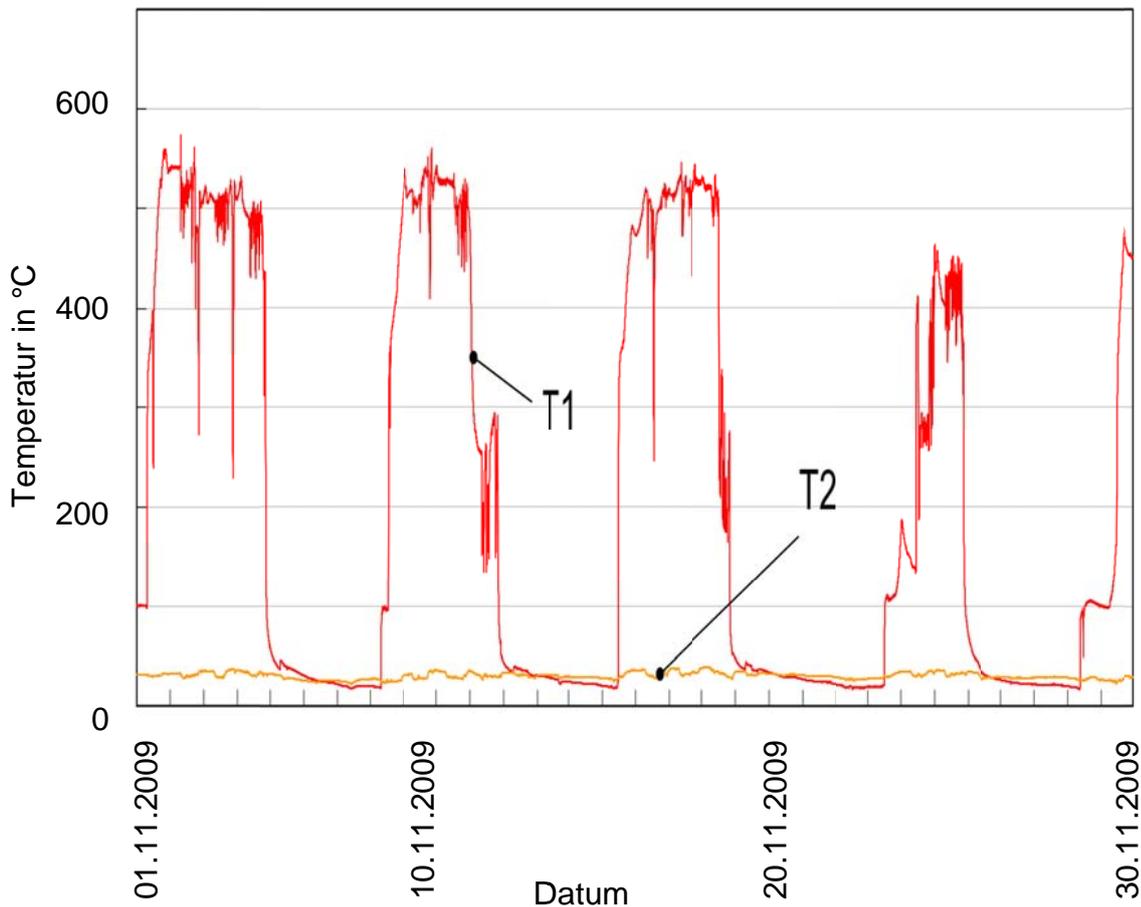


Bild 10: Abgastemperatur im November 2009

Bild 11 zeigt beispielhaft die Erdgas- und Brennluftvolumenströme für die Woche vom 11.06. bis 17.06.2012. Es zeigt sich, dass der Schmiedeofen nicht kontinuierlich, sondern nur phasenweise befeuert wird. Der durchschnittliche Brennluftvolumenstrom liegt bei rd. 1.500 m³/h mit Spitzen bis zu 3.000 m³/h. In **Bild 12** ist dieser Zusammenhang anhand der Volumenströme für Mittwoch den 13.06.2012 beispielhaft detaillierter dargestellt. Der diskontinuierliche Betrieb des Ofens ist deutlich zu erkennen. Brenngas und Brennluft werden je nach Anforderung zugeführt oder wieder gedrosselt.

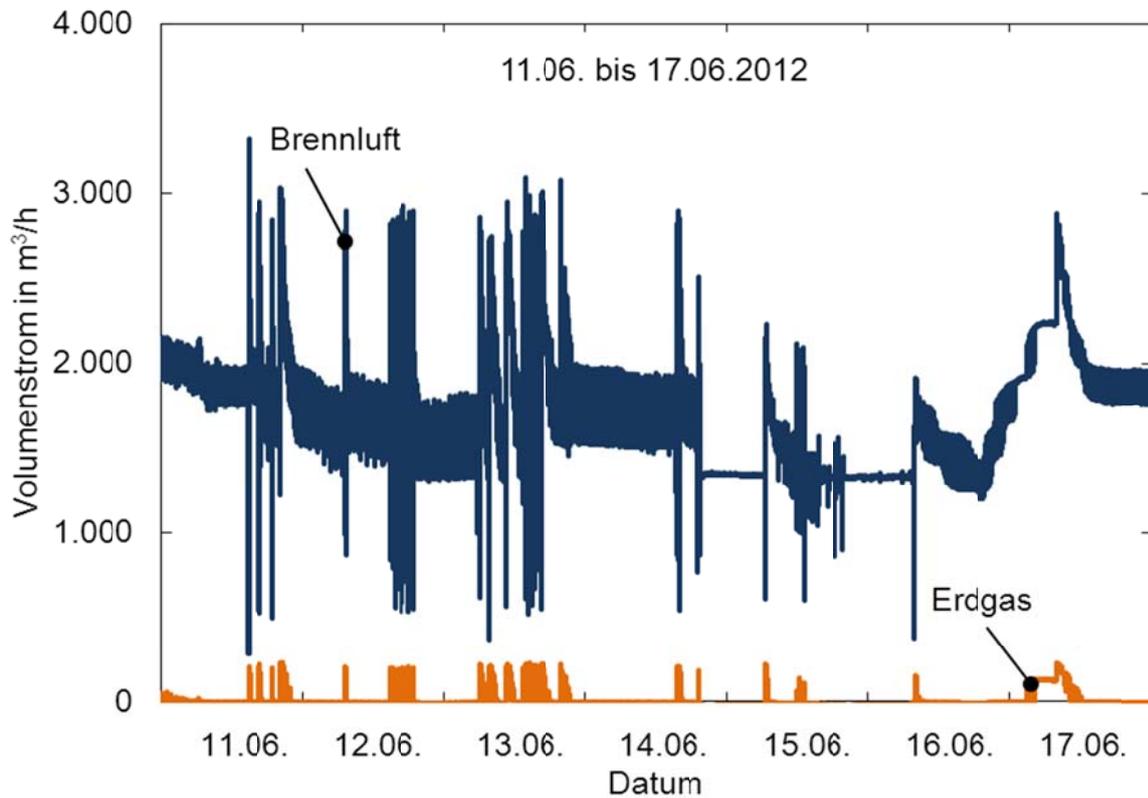


Bild 11: Erdgas- und Brennluftvolumenstrom für die Woche vom 11. bis 17.06.2012 am Schmiedeofen 4

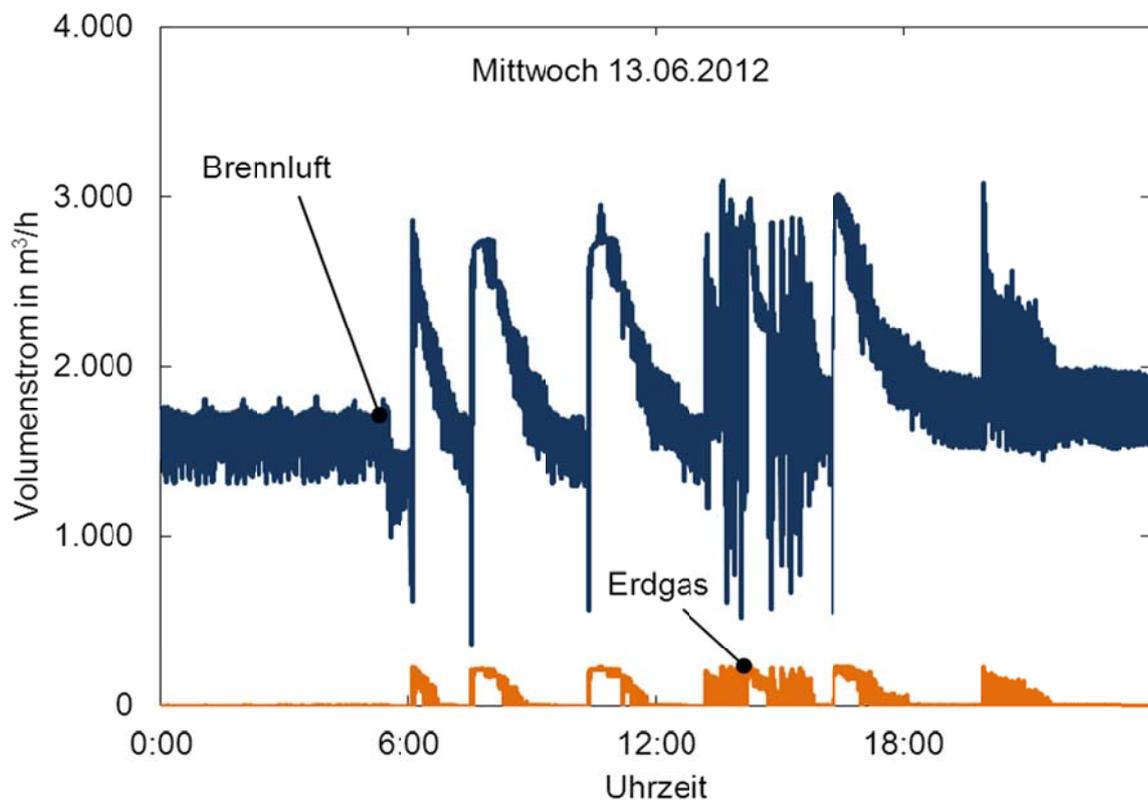


Bild 12: Erdgas- und Brennluftvolumenstrom am 13.06.2012 am Schmiedeofen 4

Insgesamt ergab sich aus den Messdaten ein maximaler Volumenstrom für Erdgas von 240 m³/h bei einem Brennluftvolumenstrom von rd. 2.940 m³/h. Daraus berechnet sich

bei einem Heizwert von $33,3 \text{ MJ/m}^3_{i.N.}$ für das Erdgas in Remscheid eine Ofenleistung von rd. 2.200 kW_{th} . Der ermittelte maximale Abgasvolumenstrom betrug rd. $3.160 \text{ m}^3/\text{h}$. Dies ergab bei einer Abgastemperatur von 550°C eine thermische Abgasleistung von rd. 710 kW bei maximaler Ofenleistung. Für 4 angeschlossene Öfen gleicher Bauweise ergab sich so eine maximale thermische Abgasleistung von 2.840 kW_{th} . Dies gilt jedoch nur bei maximaler Ofenleistung, so dass für den Teillastbetrieb mit einer entsprechend geringeren Abwärmeleistung zu rechnen war. Daher wurde von einer maximalen Abwärmeleistung von 75 % ausgegangen, so dass zu diesem Zeitpunkt des Forschungsprojekts rd. 2.100 kW_{th} als Maximum für die Auslegung des Verstromungsverfahrens zu berücksichtigen waren. Im späteren Verlauf des Projektes stellte sich heraus, dass aufgrund der Änderung der Unternehmensziele von Grimm, von der Serienfertigung zur Stückauftragsfertigung, nur 3 baugleiche Öfen und ein Ofen mit deutlich geringerer Leistung für die Abwärmeverstromung genutzt werden konnten, so dass effektiv eine geringere Abgasleistung zur Verfügung steht. Zu diesem Zeitpunkt war das Verstromungsverfahren jedoch schon ausgelegt und bestellt, so dass keine Anpassungen mehr gemacht werden konnten und das Verstromungsverfahren letztendlich für die zur Verfügung stehende Abwärmeleistung überdimensioniert wurde.

Die Gesamtbefeuerszeit mit mindestens 25 % der maximalen Ofenleistung betrug während der vier Wochen im Juni rd. 116 h, davon rd. 48 h bei voller Leistung und rd. 46 h bei noch mindestens halber Leistung. Die höchste Ofenleistung wurde während der Aufheizphasen nach Stillständen an Wochenenden und Feiertagen erreicht. Ist die erwünschte Ofentemperatur erreicht, wird nur noch befeuert, um die Temperatur im Ofen auf dem Sollwert zu halten, d. h. es müssen nur noch die Wärmeverluste des Ofens und die Wärme zum Aufheizen des Nutzguts aufgebracht werden.

Zusammen mit Messungen in der Abgasleitung und am Ofen 3 konnte für beide Öfen über einen längeren Zeitraum die Feuerungs- und Abgasleistung bestimmt werden. In **Bild 13** sind beispielhaft für November 2012 die thermische Leistung der Feuerung und des Abgases in der Abgassammelleitung nach dem Rekuperator sowie der Brenngasvolumenstrom für die an die ORC-Anlage angeschlossenen Öfen 3 und 4 aufgetragen. Es zeigt sich, wie auch schon in vorausgehenden Messungen eine große Schwankungsbreite bei der Befeuersung der Öfen. Dadurch ergibt sich ein stark diskontinuierlicher Abwärmestrom.

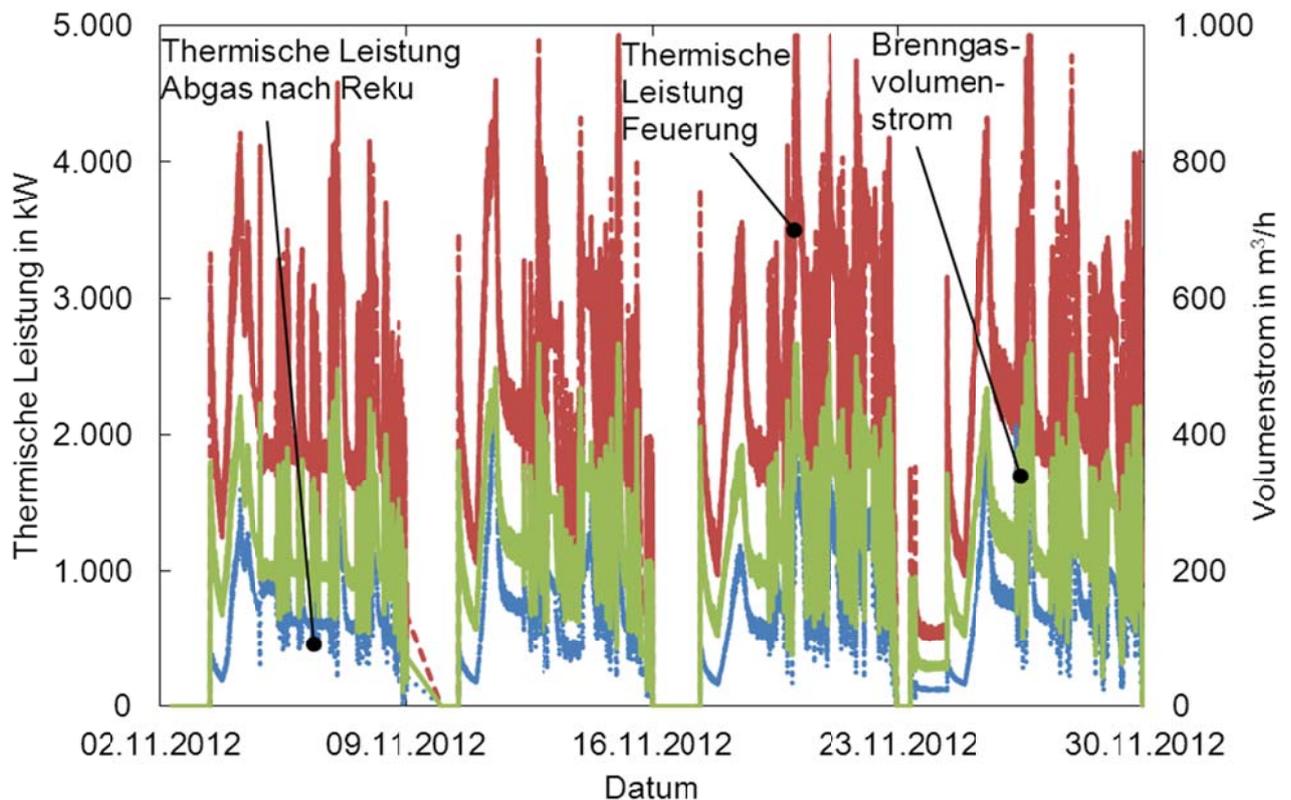


Bild 13: Summe thermische Leistung und Brenngasvolumenstrom Ofen 3 und 4

6.1.4 Ermittlung der Hauptstromverbraucher und Erfassung des Stromverbrauchs

Zur Erfassung des Stromverbrauchs der Hauptverbraucher wurden entsprechende Messeinrichtungen installiert. **Bild 14** zeigt die fotografische Ansicht von einer der installierten Messeinrichtungen, in diesem Fall von der Messung des Stromverbrauchs an der 800 t Presse.

Als Hauptstromverbraucher wurden die beiden Pressen (800 t und 1.600 t) mit rd. 1/3 des Gesamtstromverbrauchs identifiziert. Messergebnisse belegen einen monatlichen Stromverbrauch der o. g. Anlagen z. B. für den August 2010 von rd. 200.000 kWh. Weitere große Stromverbraucher sind die elektrischen Nitrieröfen, der Druckluftkompressor sowie die Zurichterei mit Richtpresse und Vergütereie. In **Bild 15** ist beispielhaft die abgenommene elektrische Leistung für die Nitriererei im August 2010 dargestellt. Die durchschnittliche Leistung beträgt rd. 130 kW mit Spitzen von bis zu 650 kW. Die minimale Leistungsabnahme liegt bei rd. 25 kW.



Bild 14: Strommesseinrichtung an der 800 t Presse

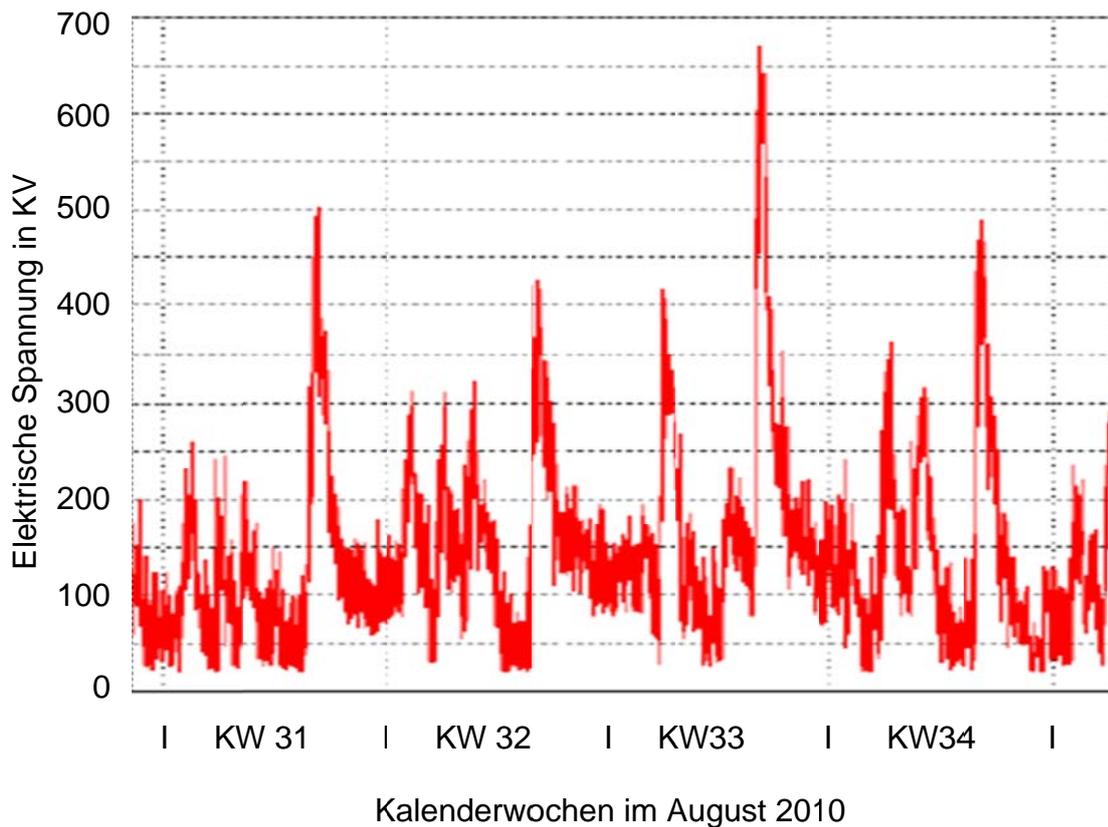


Bild 15: Abgenommene elektrische Leistung in der Nitriererei im August 2010

6.1.5 Schlussfolgerung aus den Betriebsmessungen

Aus den Betriebsmessungen hat sich ergeben, dass die maximale mögliche Abwärmeleistung aller vier Öfen zusammen bei rd. $2,8 \text{ MW}_{\text{th}}$ lag. Dies ist jedoch nur für den gleichzeitigen Betrieb aller vier Schmiedeöfen mit maximaler Leistung der Fall, so dass

für den Teillastbetrieb mit einer entsprechend geringeren Abwärmeleistung zu rechnen war. Deshalb wurde für die Auslegung des Verstromungsverfahrens von maximal 75 % der maximalen Abwärmeleistung ausgegangen, was rd. 2,1 MW_{th} entspricht.

Die Abgastemperatur nach dem Rekuperator betrug maximal 550°C. Die Messung der Abgaszusammensetzung hat gezeigt, dass sich aus dem SO₂-Gehalt des Abgases und der Staubzusammensetzung keine erhöhte Schädigungsgefahr für die nachgeschaltete Verstromungsanlage oder deren Wärmeübertrager ergibt.

Aufgrund der kurzfristigen Produktionsplanung, des Entnehmens und Einlegens des Schmiedeguts in die Öfen sowie der Wochenendstillstände ist der Betrieb der Schmiedeöfen und damit auch die Leistung des Abwärmestroms stark diskontinuierlich. Diese Diskontinuität war bei der Auswahl eines geeigneten Verstromungsverfahrens besonders zu berücksichtigen: Zum einen musste das Verstromungsverfahren automatisch und schnell anfahren, wenn genügend Abwärme vorliegt und zum anderen musste das Verfahren gut im Teillastbereich „zu fahren“ sein. Näheres zur Auswahl des Verstromungsverfahrens findet sich in Kap. 6.3.1.

Hauptstromverbraucher sind die beiden Pressen mit rd. 1/3 des Gesamtstromverbrauchs. Weitere große Stromverbraucher sind die elektrischen Nitrieröfen, der Druckluftkompressor und die Schleiferei. Aufgrund der Produktionsplanung ist auch der Stromverbrauch stark diskontinuierlich, mit kurzfristigen hohen Verbräuchen.

6.2 Erstellung eines Ofenbilanzierungsprogramms

Zur sinnvollen Nutzung des Verstromungsverfahrens im Gesamtschmiedeprozess wurde ein Ofenbilanzierungsprogramm entwickelt. Das Programm beinhaltet Prognosefunktionen zum Erdgas- und Stromverbrauch, sowie der Abwärmeleistung und dem daraus zu erzeugenden Strom, siehe **Tabelle 5**.

Tabelle 5: Übersicht der Arbeiten und Ergebnisse zum Ofenbilanzierungsprogramm

Zugehörige Arbeitsschritte AS 2 - 6
<p>Ziele</p> <ul style="list-style-type: none"> • Koordination und Prognose des Energiebedarfs der einzelnen Schmiedeöfen • Koordination und Prognose des Strombedarfs der größten Verbraucher im Schmiedebetrieb und der Stromproduktion durch die ORC-Anlage
<p>Durchgeführte Arbeiten</p> <ul style="list-style-type: none"> • Durchführung einer energetischen Bilanzierung von Schmiedeöfen anhand der Ergebnisse der Betriebsmessungen • Ofenbilanzierungsprogramm für bis zu 4 Schmiedeöfen und bis zu 168 Betriebsstunden • Implementierung der wichtigsten Stromverbraucher und der Stromproduktion der ORC-Anlage

Tabelle 5: Übersicht der Arbeiten und Ergebnisse zum Ofenbilanzierungsprogramm (Fortsetzung)

Zugehörige Arbeitsschritte AS 2 - 6
<p>Durchgeführte Arbeiten</p> <ul style="list-style-type: none"> • Implementierung von Überprüfungsrouitinen zur Vermeidung von Fehleingaben • Implementierung der grafischen Ergebnisdarstellung in der Bedienoberfläche • Entwicklung einer Visual Basic Eingabe- und Ausgabeoberfläche • Erstellung einer umfassenden Bedienungsanleitung • Implementierung des Ofenbilanzierungsprogramms bei Grimm • Validierung des Ofenbilanzierungsprogramms
<p>Ergebnisse</p> <ul style="list-style-type: none"> • Eine auf Excel basierende Software zur energetischen Bilanzierung der Schmiedeöfen wurde entwickelt. • Ausgabewerte der Bilanzierungssoftware sind Prognosen des zu erwartenden Erdgas- und Stromverbrauchs sowie der Stromproduktion der Verstromungsanlage in Abhängigkeit der Produktionsplanung für bis zu eine Woche. • Eine Visual-Basic Oberfläche zur besseren Bedienbarkeit der Software wurde entwickelt und implementiert. • Das Ofenbilanzierungsprogramm wurde bei Grimm installiert.

6.2.1 Energetische Bilanzierung der Schmiedeöfen

Zur besseren Beurteilung der ein- und austretenden Energieströme und als Grundlage des energetischen Ofenbilanzierungssystems wurde eine energetische Bilanzierung der Schmiedeöfen vorgenommen. Für die Bilanzierung wurden berücksichtigt:

- von außen eintretende Stoff- und daran gekoppelte Energieströme durch Brennstoff und Brennluft sowie
- austretende Energieströme durch die Erwärmung des Schmiedeguts und der Ofenwände, das Abgas, Wandwärmeverluste über die Ofenwände sowie das Öffnen der Ofentür an die Umgebung.

Für die Energiebilanz eines Schmiedeofens ergibt sich:

$$0 = \dot{E}_{EG} + \dot{E}_{BL} - \dot{E}_{AG} - \dot{E}_{SG} - \dot{E}_{OW} - \dot{E}_{Verl,OW} - \dot{E}_{Verl,OT} \quad (1)$$

Die Gasmassenbilanz lautet:

$$0 = \dot{m}_{EG} + \dot{m}_{BL} - \dot{m}_{AG} \quad (2)$$

Die Energieströme werden über die Massenströme, die Ofenraum-, Abgas-, Brenngas- und Brennlufttemperatur, die temperaturabhängigen spezifischen Wärmekapazitäten der Gase, des Schmiedeguts und der Ofenwände, den unteren Heizwert des Brenngases, den Wärmeübergang der Ofenwand an die Umgebung und die Verluste durch das Öffnen der Ofentür berechnet. Die erforderlichen Stoffwerte wurden [17] und [18] entnommen. Es gilt:

$$\dot{E}_{EG} = \dot{m}_{EG} \times (c_{p,EG} \times (T_{EG} - T_U) + H_{u,EG}) \quad (3)$$

$$\dot{E}_{BL} = \dot{m}_{BL} \times (c_{p,BL} \times (T_{AG} - T_U)) \quad (4)$$

$$\dot{E}_{AG} = \dot{m}_{AG} \times (c_{p,AG} \times (T_{AG} - T_U)) \quad (5)$$

$$\dot{E}_{SG} = \frac{m_{SG} \times (c_{p,SG} \times (T_{SG} - T_U))}{t} \quad (6)$$

$$\dot{E}_{OW} = \frac{m_{OW} \times (c_{p,OW} \times (T_{OW} - T_U))}{t} \quad (7)$$

$$\dot{E}_{Verl,OW} = A_{OW} \times (\alpha_{OW,a \rightarrow U} \times (T_{OW,a} - T_U) + \sigma \times \varepsilon_{OW} \times (T_{OW,a}^4 - T_U^4)) \quad (8)$$

Für die Wandwärmeverluste des Ofens an die Umgebung werden eine Außenwandtemperatur von max. 60°C und eine Umgebungstemperatur von 15°C zu Grunde gelegt. Für den Wärmeübergangskoeffizienten von der Ofenwand an die Umgebung werden entsprechend [19] 10 W/(m² K) abgeschätzt.

Die Wärmeverluste des Ofens an die Umgebung durch das Öffnen der Ofentür bei Be- und Entladevorgängen werden nach [20] berechnet:

$$\dot{E}_{Verl,OT} = t' \times (\dot{m}_0 \times c_{p,AG} \times (T_{AG} - T_U) + A_{OT} \times \sigma \times \varepsilon_{OR} \times (T_{OR}^4 - T_U^4)) \quad (9)$$

mit

$$\dot{m}_0 = 4,467 \times \sqrt{\frac{273}{T_{AG}}} \times \varphi \times \sqrt{\Delta p} \times A_{OT} \times \rho_{AG} \quad (10)$$

und einer spezifischen Öffnungszeit von

$$t' = 6 \text{ s/t}$$

einem Öffnungskoeffizienten [20] von

$$\varphi = 0,38$$

sowie einem Ofenüberdruck von

$$\Delta p = 200 \text{ Pa}$$

Als Grundlage für das spätere Ofenbilanzierungssystem wurde eine Parameterstudie für die Erwärmung des Schmiedeguts auf 1.200°C in einem Ofen mit den Abmessungen 6,0 x 4,0 x 3,5 m durchgeführt. Variiert wurden die Stahlsorte des Schmiedeguts und die Ofenbelegung (50 und 100 t). Aus den Betriebsmessungen ergaben sich primär zunächst zwei zu bilanzierende Betriebszustände der Schmiedeöfen: Das Aufheizen des Ofens auf Schmiedetemperatur und der Haltebetrieb, bei dem die Blöcke auf Schmiedetemperatur erwärmt werden. Die Aufheizung des Ofens und die Schmiedeguterwärmung wurden im Bilanzierungsmodell miteinander gekoppelt. Entsprechend sogenannter

Ofenreisen, die die Erwärmung des Schmiedegutes mit abwechselnden Aufheiz- und Haltephasen beschreiben, wurde die energetische Bilanzierung in einzelnen Phasen konzipiert.

Als Werkstoff des Schmiedegutes wurden verschiedene niedrig bis hoch legierte Stähle verwendet, vgl. **Tabelle 6**.

Tabelle 6: Ausgesuchte Stahlsorten für die Parameterstudie und das Ofenbilanzierungsprogramm [18], [21]

Nr.	Stahlsorten und Werkstoffnummern
1	Unlegierte Qualitätsstähle bis C = 0,45 %, z. B. 1.001, 1.0301, 1.0401, 1.0501, 1.0503
2	Legierte Edelstähle: Werkzeugstähle mit Cr, z. B. 1.2058 / Baustähle mit Cr bzw. Cr-Mn, z. B. 1.7043, 1.7121
3	Legierte Edelstähle: Werkzeugstähle mit Cr-Mo z. B. 1.2302, 1.2323, 1.2330, Baustähle mit Cr-Mo mit Mo < 0,35 % z. B. 1.7202, 1.7223
4	Legierte Edelstähle: Baustähle mit Mn und Si, z. B. 1.5026
5	Legierte Edelstähle: Verschleißfeste Stähle, z. B. 1.3401, 1.3403
6	Legierte Edelstähle: Nichtrostende Edelstähle mit Ni < 2,5 % ohne Mo, Nb und Ti, z. B. 1.4015
7	Legierte Edelstähle: Schnellarbeitsstähle ohne Co, z. B. 1.3355
8	Legierte Edelstähle: Nichtrostende Stähle mit Sonderzusätzen, z. B. 1.4541, 1.4550, 1.4571
9	Legierte Edelstähle: Hochwarmfeste Stähle, z. B. 1.4919, 1.4948, 1.4949
10	Legierte Edelstähle: Nichtrostende Stähle mit Ni > 2,5 % ohne Mo, Nb und Ti, z. B. 1.4301

Als Brenngas wurde bei den Berechnungen das in der Region Remscheid zur Verteilung kommende Erdgas mit folgender Zusammensetzung verwendet:

CO ₂ :	1,49 Vol.- %	CH ₄ :	84,68 Vol.- %
N ₂ :	9,76 Vol.- %	C ₂ H ₆ :	3,30 Vol.- %
O ₂ :	<0,01 Vol.- %	C ₃ H ₈ :	0,52 Vol.- %
		C ₄ H ₁₀ + höhere Kohlenwasserstoffe:	0,25 Vol.- %

Die Dauer der Phasen wurde entsprechend der Ofenbelegungsstrategie (siehe auch Kap. 6.1.2) festgelegt:

1. Aufheizphase 1 bis 500°C.
2. Haltephase 1, so dass sich 10 Stunden mit der Aufheizphase 1 ergeben.
3. Aufheizphase 2 auf 650°C in 3 Stunden.
4. Haltephase 2 für 10 Stunden.
5. Aufheizphase 3 auf rd. 1.200°C (Schmiedetemperatur) in 10 Stunden.
- 6./7. Haltephase 3 je nach Ofenbelegung und Blockgröße, hier insgesamt 10 Stunden.

Der Ofen wird nach der Ofenraumtemperatur geregelt. **Bild 16** zeigt schematisch den Verlauf der Ofenraumtemperatur entsprechend der einzelnen Phasen.

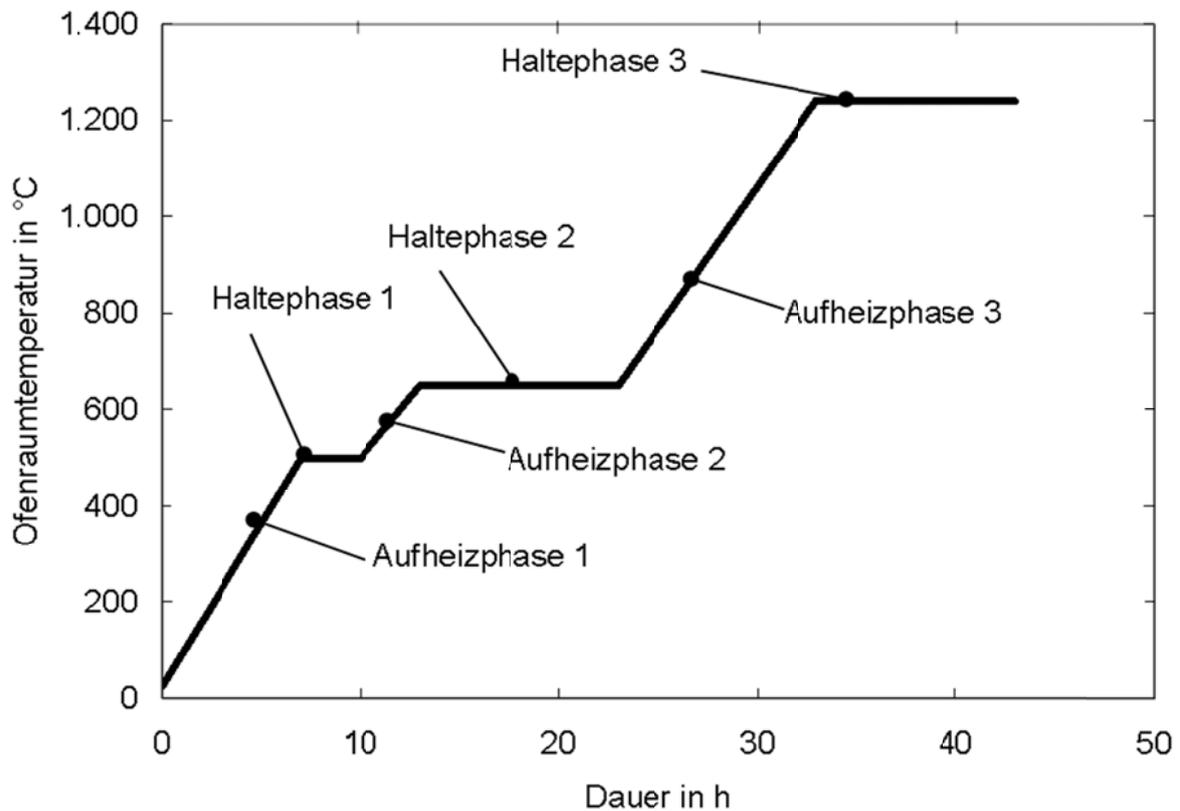


Bild 16: Schematische Darstellung der Aufheiz- und Haltephasen einer Ofenreise

Die Dicke der Wärmedämmung der Wände, der Decke, des Bodens/Herdwagens und der Ofentür beträgt rd. 300 mm. Die Dichte des Feuerfestmaterials wurde für Wände, Decken und Ofentür mit 1.550 kg/m^3 für den Boden/Herdwagen auf Grund der höheren mechanischen Belastung mit 3.000 kg/m^3 angenommen. Die Brennluftvorwärmung beträgt maximal 375°C . Die wichtigsten Ergebnisse der Parameterstudie sind in **Tabelle 7** zusammengefasst. Je nach Stahlsorte ändert sich der spezifische Energiebedarf zur Schmiedeguterwärmung zwischen rd. $0,67$ und $0,80 \text{ GJ/t}_{\text{SG}}$. Damit einhergehend steigen oder sinken auch der mittlere Erdgasverbrauch und der Ofenwirkungsgrad über die Ofenreise. Bei geringerer Ofenbelegung sinkt der Ofenwirkungsgrad signifikant, da zur Erwärmung der geringeren Schmiedegutmasse immer noch der gesamte Ofen bzw. die Ofenausmauerung mit erwärmt werden muss.

Der ermittelte spezifische Energiebedarf während der Ofenreise zeigt, dass von jeweils rd. $1,8 - 2,0 \text{ GJ/t}_{\text{SG}}$ zugeführter Energie letztendlich rd. $0,66 - 0,80 \text{ GJ/t}_{\text{SG}}$ für die Erwärmung des Schmiedeguts verwendet werden. Der Rest geht mit der Aufheizung des Ofens, Wandwärmeverlusten, Undichtigkeiten des Ofens, durch das Öffnen und Schließen der Ofentür sowie dem Abgas verloren.

Tabelle 7: Berechneter Gasverbrauch und Ofenwirkungsgrad (Schmiedetemperatur von 1.200°C, Ofenreisendauer 43 Stunden)

Nr.	Ofenbelegung 50 t			Ofenbelegung 100 t		
	Mittlerer Gasverbrauch in m ³ _{i.N./h}	Spez. Energiebedarf Schmiedeguterwärmung in GJ/t	Gesamt-ofenwirkungsgrad in %	Mittlerer Gasverbrauch in m ³ _{i.N./h}	Spez. Energiebedarf Schmiedeguterwärmung in GJ/t	Gesamt-ofenwirkungsgrad in %
1	106	0,803	27	146	0,803	39
2	105	0,786	27	144	0,786	39
3	104	0,782	27	143	0,782	39
4	105	0,790	27	144	0,790	39
5	102	0,747	26	139	0,747	39
6	101	0,715	25	136	0,715	38
7	99	0,667	24	132	0,667	36

Basierend auf der beschriebenen Bilanzierung der Schmiedeöfen wurde das Modell anschließend auf die gleichzeitige energetische Bilanzierung von bis zu 4 Schmiedeöfen erweitert. Der maximal zu berechnende Zeitraum beträgt eine Woche (= 168 Stunden). Hierbei werden entsprechend der Eingaben für jede Stunde Energiebilanzen jedes einzelnen Schmiedeofens für jeweils eine Stunde aufgestellt und gelöst, so dass sich für eine Berechnung maximal 672 (4 x 168) zu lösende Energiebilanzen ergeben. In den Bilanzen werden die Energieströme für die Erwärmung der Schmiedeblocke und die Ofenausmauerung, die Wandwärmeverluste sowie die Energieströme durch Brenngas, Brennluft und Abgas berücksichtigt. Die Bilanzen aufeinander folgender Stunden sind über die berechneten Temperaturen der Schmiedeblocke, des Ofenraumes, der Ofenausmauerung und der Außenwand miteinander verknüpft. Basierend auf den ermittelten Eingangs- und Ausgangstemperaturen der Schmiedeblocke, des Ofenraums, der Ofenausmauerung und der Außenwand werden die Energiebilanzen aufgestellt und gelöst. Zur Kontrolle der Massenbilanz der Gasströme werden die Massenströme der eintretenden Gase mit dem austretenden Abgasmassenstrom abgeglichen.

Als Eingabevariablen für die einzelnen Öfen stehen zur Verfügung:

- Anzahl zu berechnender Schmiedeöfen (maximal 4),
- Schmiedeblockdaten: Anzahl (maximal 20 je Schmiedeofen), Gewicht, Liegezeit, Eingangstemperatur und Stahlsorte (vgl. Tabelle 6) sowie
- Dauer, Anfangs- und Endtemperatur der einzelnen Aufheizphasen.

Zudem sind u. a. folgende Werte vorgegeben:

- Ofenabmessungen,
- die Brenngaszusammensetzung und –temperatur sowie
- das Luftverhältnis.

Bild 17 zeigt zusammenfassend die Kategorien der Eingabe und Ausgabedaten des Ofenbilanzierungsprogramms.

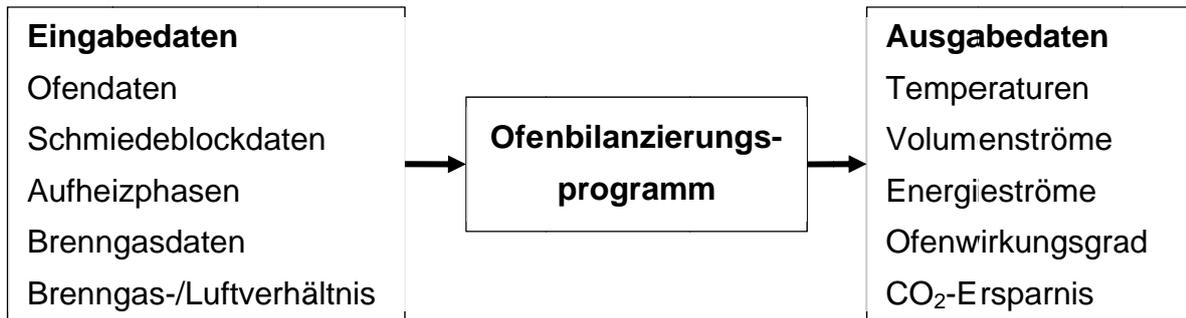


Bild 17: Kategorien der Eingabe- und Ausgabedaten des Ofenbilanzierungsprogramms

Zur Berechnung der Aufheizung des Schmiedeguts wurde die Wärmeleitfähigkeit der verschiedenen Stahlsorten in die Berechnungsalgorithmen integriert. Dadurch ist eine realistischere Abschätzung der Aufheizdauer des Schmiedeguts in Abhängigkeit der Stahlsorte möglich. **Bild 18** zeigt die Wärmeleitfähigkeit der im Ofenbilanzierungssystem berücksichtigten Stahlsorten entsprechend der verwendeten Kennzahlen, siehe Tabelle 6, in Abhängigkeit der Temperatur. Innerhalb des Ofenbilanzierungssystems wird die Wärmeleitfähigkeit für jede Stunde neu bestimmt, so dass die Änderung der Wärmeleitfähigkeit mit steigender Temperatur ebenfalls berücksichtigt wird.

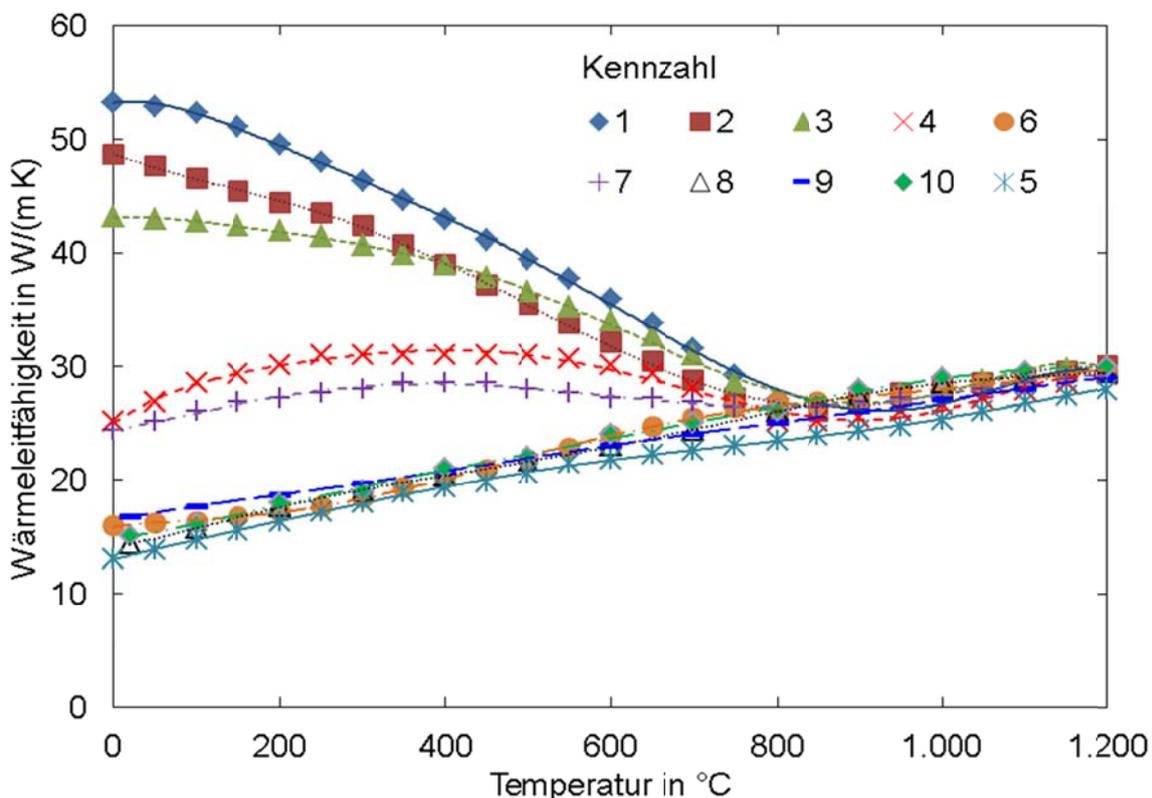


Bild 18: Wärmeleitkoeffizienten für die verschiedenen Stahlsorten (entsprechend Tabelle 6)

Die Ausmauerung des Ofens wird bei der Berechnung mit verschiedenen Materialien berücksichtigt. Zur Auswahl des Werkstoffs der Feuerfestzustellung stehen drei Gruppen zur Verfügung, die Stoffwerte wurden den Literaturquellen [18] und [21] entnommen:

1. SiO₂, SiC und Al₂O₃ Steine
2. Magnesitsteine
3. Graphitsteine

Um eventuelle zukünftige Änderungen in der Brenngaszusammensetzung berücksichtigen zu können, besteht die Möglichkeit eine vorgegebene Brenngaszusammensetzung durch Eingabe einer Kennzahl auszuwählen (aus 8 verschiedenen Brenngasen, davon 4 Erdgase) oder eine eigene Brenngaszusammensetzung einzugeben. Die vorgegebenen Brenngase sind in **Tabelle 8** zusammengefasst.

Tabelle 8: Im Ofenbilanzierungsprogramm berücksichtigte Brenngase

Nr.	Gasart	Zusammensetzung in Vol.-%								
		CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	N ₂	CO ₂	O ₂
1	Erdgas Remscheid	0,0	0,0	84,7	3,3	0,5	0,3	9,7	1,5	0,0
2	Weser/Ems Erdgas	0,0	0,0	88,0	0,6	0,0	0,0	8,8	2,6	0,0
3	Russisches Erdgas	0,0	0,0	97,6	1,0	0,3	0,1	0,0	0,9	0,1
4	Nordsee Erdgas	0,0	0,0	86,2	8,5	1,9	0,4	0,1	1,0	1,9
5	Bio-/Klärgas	0,0	0,0	65,0	0,0	0,0	0,0	1,0	34,0	0,0
6	Gichtgas	20,0	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	56,0	20,0	0,0
7	Konvertergas	65,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	17,0	16,0	0,0
8	Koksofengas	5,0	55,0	25,0	2,5	0,0	0,0	10,0	2,0	0,5

Die wichtigsten Ausgabedaten werden für jeden Ofen sowie für alle berechneten Öfen zusammen in jeweils einzelnen Ausgabedateien graphisch und tabellarisch zusammengefasst. Die ausgegebenen Daten sind u. a.:

- Temperaturen zu jeder Stunde (Schmiedeblocke, Ofenraum, Ofenausmauerung und Außenwand),
- Volumenströme (Brenngas, Brennluft und Abgas),
- Energieströme (Brenngas, Brennluft, Erwärmung Schmiedeblocke, Abgas vor und nach Rekuperator, Erwärmung Ofenausmauerung und Wandverluste),
- Ofenwirkungsgrad und
- CO₂-Ersparnis durch den Betrieb der ORC-Anlage. Als Grundlage zur Berechnung der CO₂-Ersparnis wird das vom Umwelt Bundesamt angegebene CO₂-Equivalent für den deutschen Strommix 2012 von 601 g/kWh verwendet [22].

6.2.2 Bilanzierung und Prognose von Stromproduktion und –bedarf

Je nach Produktionsablauf steigt oder sinkt der Stromverbrauch der z. T. nachgeschalteten Anlagen. Hierfür wurden Modelle erarbeitet, um Zusammenhänge zwischen Produktion und Stromverbrauch zu erkennen und um die wichtigsten Eingangsgrößen zu definieren.

In den Modellen werden die wichtigsten Stromverbraucher (1.600 t Schmiedepresse, 800 t Schmiedepresse, Nitrieröfen 1 bis 18, Kompressor und Zurichterei mit Richtpresse und Vergütereie) und die ORC Anlage als Stromquelle berücksichtigt. Die Stromproduktion der ORC-Anlage hängt im Wesentlichen vom Wirkungsgrad der Anlage ab und beträgt nach Herstellerangaben maximal rd. 14 %.

Über die einzugebende Belegung bzw. Anlagenauslastung wird die zu erwartende Anlagenleistung berechnet. Dies geschieht, wie bei der Berechnung der Schmiedeöfen für stündliche Werte mit einer maximalen Stundenzahl von 168 Stunden, entsprechend einer Woche. Die zu erwartende Stromproduktion der ORC Anlage wird über die Kopplung mit der vorausberechnete Abwärmeleistung der Schmiedeöfen und dem ORC Anlagenwirkungsgrad ermittelt. Dieser ist in **Bild 19** beispielhaft dargestellt. Da die ORC-Anlage über vier Turbinen verfügt, die sich entsprechend der thermischen Leistung der zur Verfügung stehenden Abwärme zu- und abschalten, sinkt der Wirkungsgrad der Anlage erst bei einer sehr geringen Abwärmeleistung.

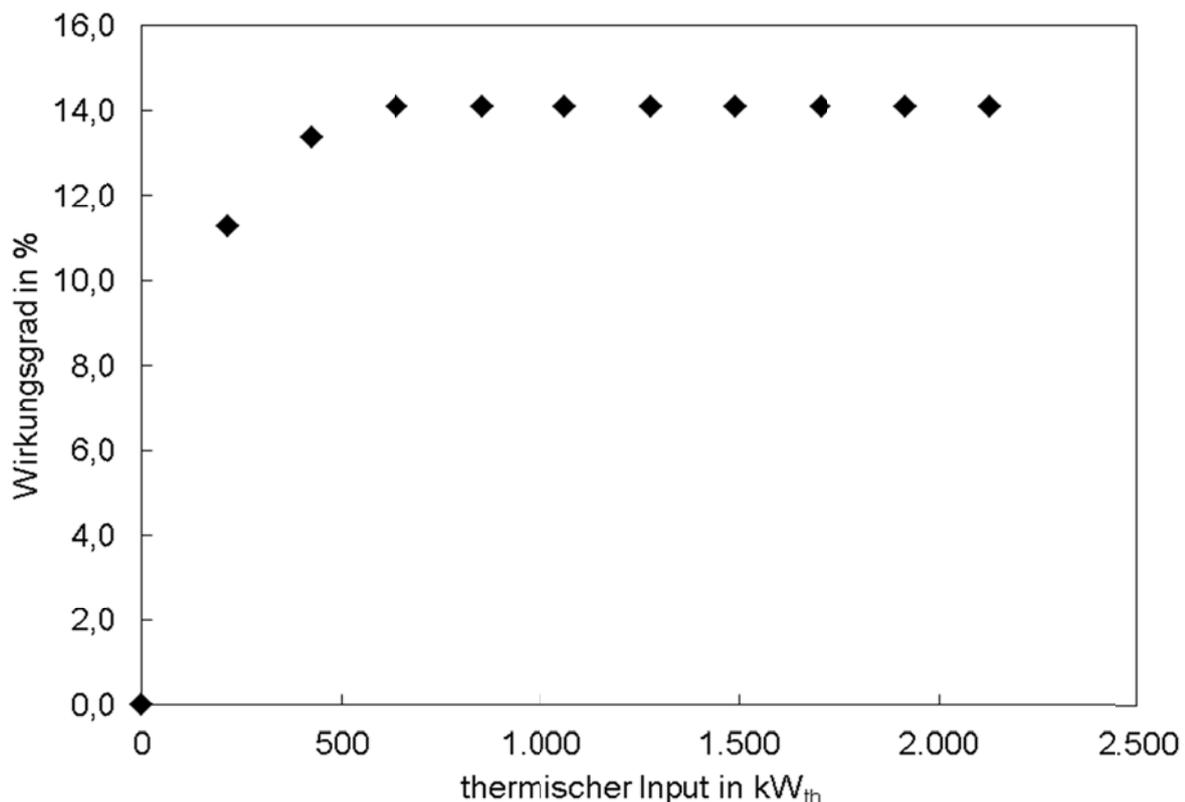


Bild 19: Verlauf des Wirkungsgrades in Abhängigkeit des thermischen Inputs für die ausgewählte ORC-Anlage

6.2.3 Erstellung einer Ein- und Ausgabeoberfläche für das Ofenbilanzierungssystem

Zur besseren Bedienbarkeit des Programms wurde eine Visual Basic Oberfläche entworfen, über die die Dateneingabe und Ergebnisausgabe gesteuert und abgewickelt werden. Zusätzlich zur Eingabe aller Daten können vorgegebene oder im vorigen Berechnungsdurchgang verwendete Eingabedaten eingelesen, verändert und als neue Vorgabedaten abgespeichert werden. Dadurch kann die Zeit zur Dateneingabe erheblich verkürzt werden. Je Schmelzofen können Daten für bis zu 20 Schmelzblöcke (Eingabedaten je Block: Gewicht, Werkstoff, Temperatur zu Beginn, Einlegezeitpunkt und Liegezeit) und die Aufheizkurve des Ofens eingegeben werden. Daten wie z. B. die Umgebungstemperatur und das verwendete Erdgas werden für alle 4 Öfen gleichermaßen verwendet. **Bild 20** zeigt exemplarisch die Visual Basic Oberfläche zum einen für die Eingabe für die Schmelzblöcke in Ofen 1 und zum anderen für die Zusammensetzung des Brenngases.

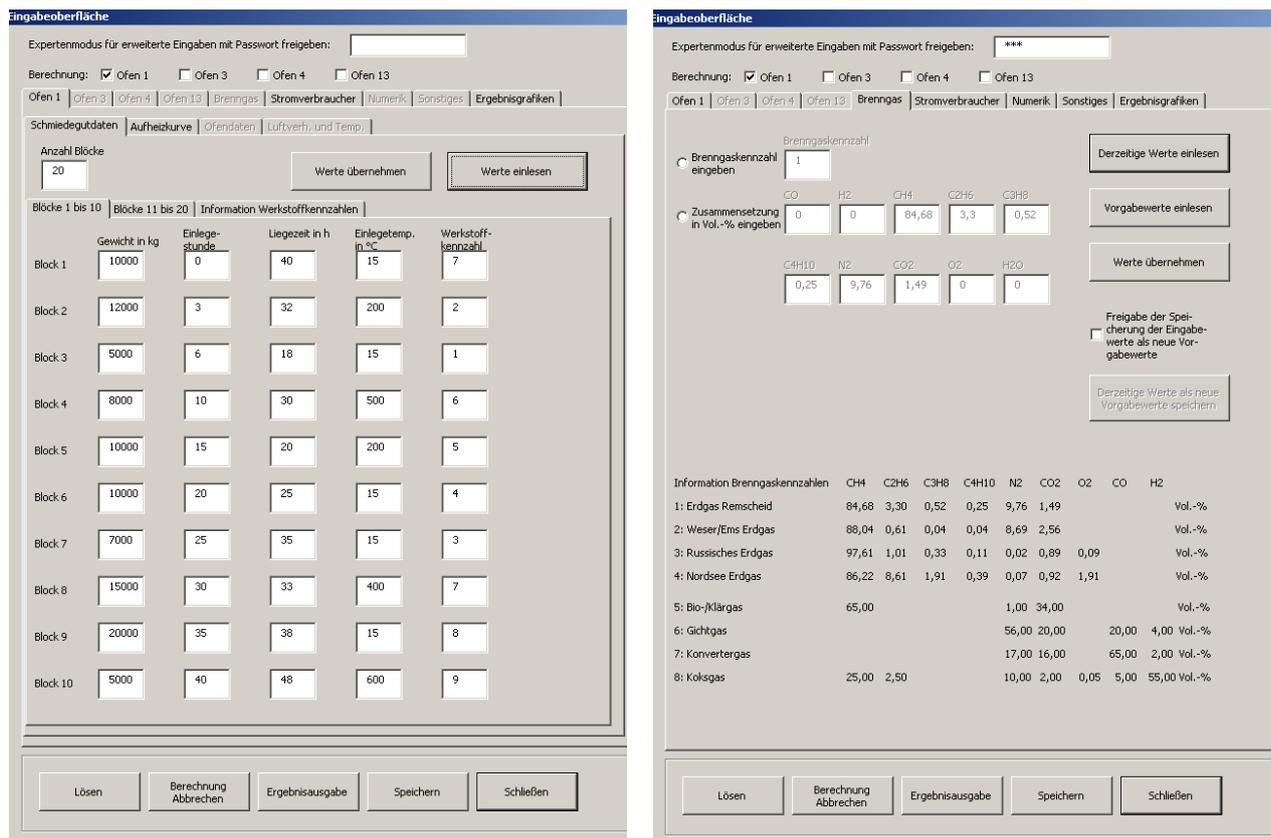


Bild 20: Visual Basic Oberfläche zur Eingabe der Schmelzgut- (links) und Brenngasdaten (rechts)

Zur Berechnung des Stromverbrauchs und der Stromproduktion sind Eingaben zur Belichtungsdauer und Auslastung der verschiedenen Stromverbraucher möglich, auf deren Basis der zu erwartende Stromverbrauch berechnet wird. In die Berechnung der zu er-

wartenden Stromproduktion wurde die Verschlechterung des Wirkungsgrades der ORC-Anlage mit sinkender Auslastung einbezogen.

Zur Steuerung der Berechnung bzgl. der Genauigkeit und Dauer ist die Anzahl der Iterationsschritte variabel ausgeführt und der maximal erlaubte Fehler kann ebenfalls manuell eingegeben werden.

Da einige Eingabeparameter nur selten bis gar nicht geändert werden müssen, wie z. B. die Ofendimensionen, sind hierfür Standardwerte hinterlegt, auf die das Programm automatisch zugreift. Um einer versehentlichen Änderung dieser Standardwerte vorzubeugen ist die Änderung/Eingabe dieser Standardwerte passwortgeschützt und so nur berechtigten Nutzer möglich.

Zur Vermeidung von Fehleingaben in die Ofenbilanzierungssoftware und zur Ausgabe von Fehlermeldungen bei Programmstörungen wurden Überprüfungsroutrinen implementiert. Dadurch wird weitestgehend verhindert, dass vom Anwender realitätsferne Eingaben gemacht werden. Es wurden für die verschiedenen Eingabeparameter Wertebereiche festgelegt, die bei der Eingabe eingehalten werden müssen, ansonsten erscheint eine Fehlermeldung und weist gezielt auf den Eingabefehler hin. Erst wenn alle Eingaben korrekt sind kann die Bilanzierung gestartet werden.

Zudem wurden Routinen implementiert, die während des Berechnungsvorgangs der Ofenbilanzierungssoftware in einer Menüleiste den Status anzeigen, welcher Wert z. Z. berechnet wird. Dadurch hat der Anwender einen besseren Überblick über den Fortschritt der Berechnungen und deren vermutliche Dauer. Ist die Berechnung beendet wird dies durch eine Meldung angezeigt.

Die Darstellung von Ergebnisgrafiken ist direkt in der Bedienoberfläche möglich. Der Anwender kann sich hier die berechneten Ergebnisse zu den Volumen- und Energieströmen, dem Ofenwirkungsgrad, dem Strombedarf und der Stromproduktion sowie zur erwarteten CO₂-Ersparnis über den berechneten Zeitraum anzeigen lassen. **Bild 21** zeigt beispielhaft die grafische Darstellung der Energieströme der vier Öfen für einen berechneten Zeitraum von einer Woche.

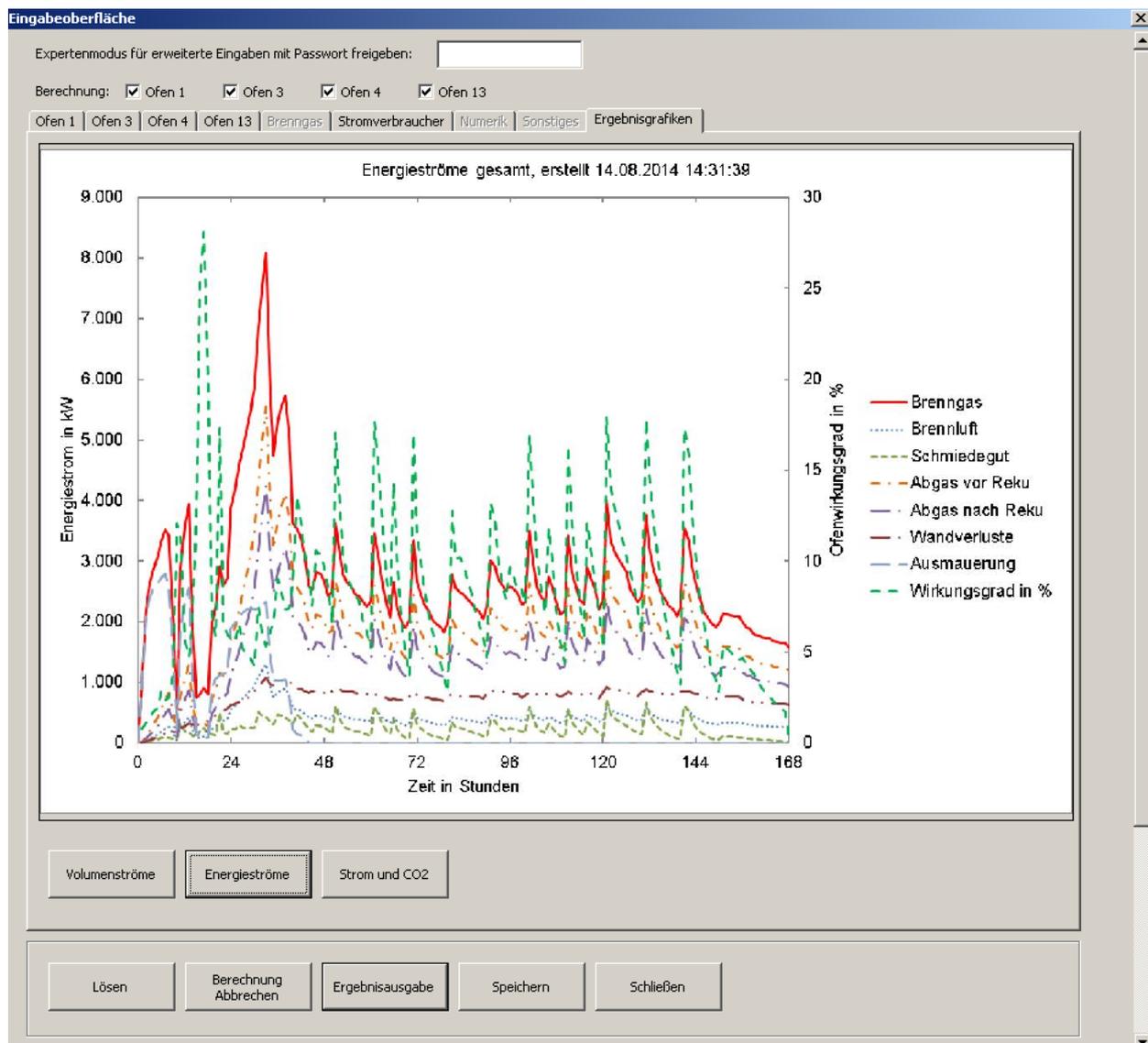


Bild 21: Grafische Darstellung der Energieströme Bedienoberfläche

Neben den Ergebnisgrafiken über den berechneten Zeitraum werden auch die Energieströme als Mittelwerte für den berechneten Zeitraum ausgegeben, vgl. **Bild 22**. Damit sind Aussagen über den Wirkungsgrad der Öfen und der ORC-Anlage möglich. Es werden die eingehenden Energieströme mit dem Brenngas und der Brennluft, sowie alle ausgehende Energieströme der vier Öfen dargestellt. Das Abgas der Öfen wird über einen Rekuperator zur Brennluftvorwärmung einer Abgassammelleitung und danach der ORC-Anlage zur Verstromung zugeführt. Anhand des zugeführten Abgasenergiestroms und der daraus produzierten Strommenge wird der Wirkungsgrad der ORC-Anlage berechnet. Dabei ist zu beachten, dass es sich jeweils um Mittelwerte über den gesamten berechneten Zeitraum handelt, der auch An- und Abfahrvorgänge beinhaltet, sowie Zeiten in denen der Ofen auf Temperatur gehalten wird, aber kein Nutzgut erwärmt wird.

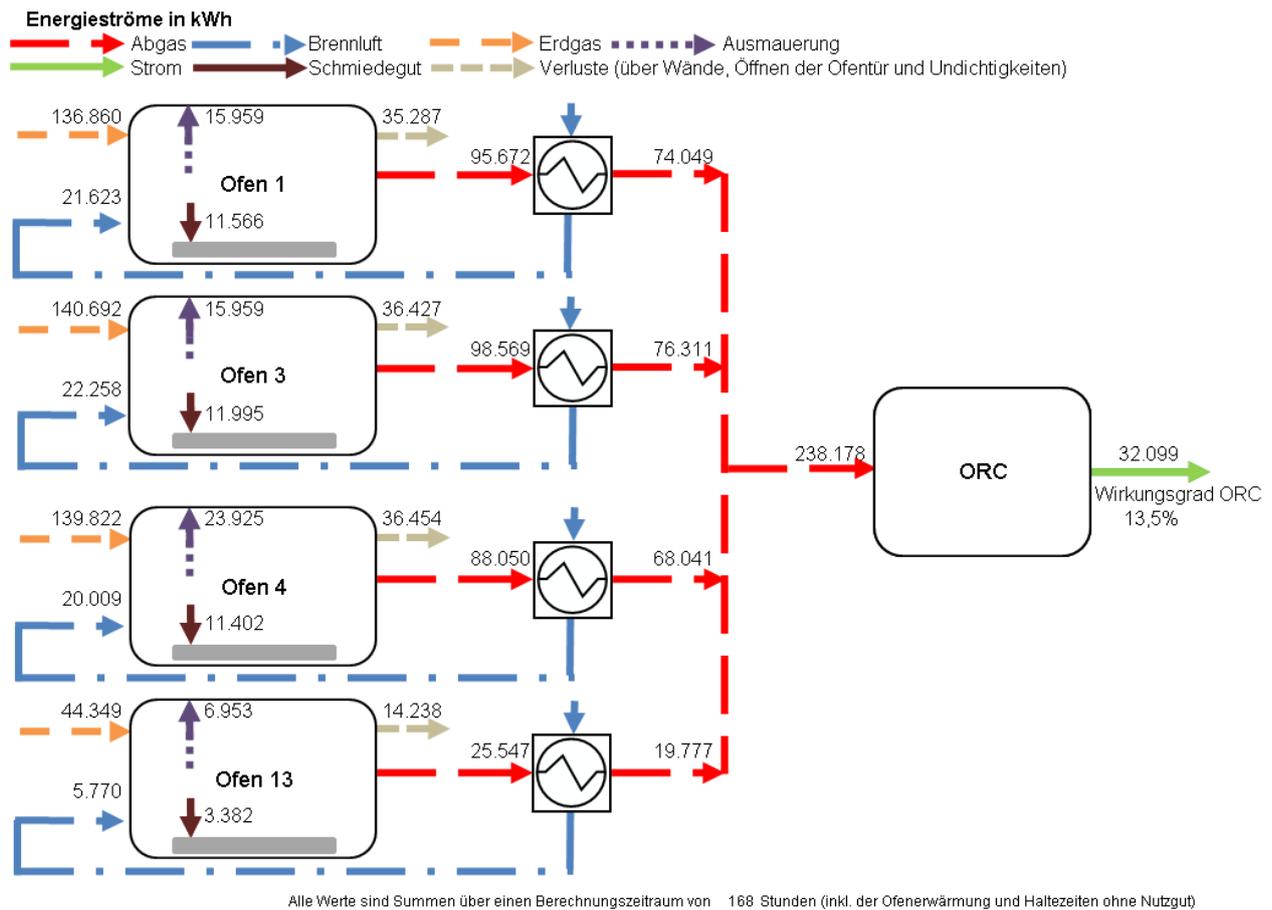


Bild 22: Ausgabe der Energieströme beispielhaft für einen berechneten Zeitraum von einer Woche (inkl. Ofenaufheizung von Umgebungs- auf Schmiedetemperatur und Haltezeiten ohne Nutzgut)

Um die Bedienung des Ofenbilanzierungsprogramms auch Anwendern, die noch nicht mit dem Programm gearbeitet haben zugänglich zu machen, wurde eine umfassende Bedienungsanleitung erstellt.

6.3 Auswahl, Inbetriebnahme und Betrieb des Abwärmeverstromungsverfahrens

Schwerpunkt des Vorhabens war der Einsatz eines Abwärmeverstromungsverfahrens als Pilotanlage zur effizienten Nutzung der Abwärme aus den Schmiedeöfen bei Grimm, siehe **Tabelle 9**.

Tabelle 9: Übersicht der Arbeiten und Ergebnisse zur Auswahl und Umsetzung des Verstromungsverfahrens

Zugehörige Arbeitsschritte AS 7 - 11
<p>Ziele</p> <ul style="list-style-type: none"> Schaffung eines neuen Anlagenverbundes für KMU, bestehend aus Schmiedeöfen und Niedertemperatur-Stromerzeugungsverfahren Auswahl und Einsatz einer Pilotanlage zur Stromerzeugung aus Abwärme an Schmiedeöfen

Tabelle 9: Übersicht der Arbeiten und Ergebnisse zur Auswahl und Umsetzung des Verstromungsverfahrens (Fortsetzung)

Zugehörige Arbeitsschritte AS 7 - 11
<p>Durchgeführte Arbeiten</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verfahrensauswahl • Engineering zum Anschluss der ORC-Anlage an die Abgassammelleitung • Arbeiten zum Aufbau der ORC-Anlage: U. a. Fundament, Stahlkonstruktion, Abgasleitungen, Regel-Drosselarmaturen, Abgasgebläse, Kaminanlage • Anschluss der Öfen 1, 3, 4 und 13 an die Abgassammelleitung • Installation des ORC-Containers, der Kondensatoren und Anschluss der ORC-Anlage an die Abgasführung und das Stromnetz • Inbetriebnahme der ORC Anlage • Behebung verschiedener Probleme beim Betrieb der ORC-Anlage: U. a. Ausfälle der Speisepumpen, Kurzschluss im Stellmotor der Bypassklappe, keine Kaskadenschaltung, Kühlmittelverlust, Defekte an den Turbinen, undichte Flanschverbindungen, Verschmutzung der Filter im Kältekreislauf
<p>Ergebnisse</p> <ul style="list-style-type: none"> • ORC auf Grund der Randbedingungen bei Grimm als am besten geeigneten Prozess ausgewählt • ORC-Anlage ausgelegt und Engineering zur Installation der ORC-Anlage durchgeführt • Grundlage zur Installation der ORC-Anlage durch zahlreiche Vorarbeiten geschaffen • ORC-Anlage installiert und an das Abgassystem angeschlossen • ORC-Anlage in Betrieb genommen • Betriebsergebnisse: <ul style="list-style-type: none"> – 2012 aufgrund zahlreicher Betriebsstörungen kein kontinuierlicher Betrieb möglich – Von April 2013 bis August 2013 erste längere Betriebsphasen der Anlage jedoch nur mit einer Turbinen; Betriebszeit 2013 rd. 2.600 h, Nettostromproduktion 2013 rd. 63.000 kWh – Seit Anfang 2014 fast kontinuierlicher Betrieb der ORC-Anlage, jedoch immer noch von kleineren Betriebsstörungen unterbrochen; Betriebszeit 2014 bis einschließlich Juli rd. 2.600 h, Nettostromproduktion 2014 bis einschließlich Juli rd. 156.000 kWh

6.3.1 Auswahl des Verstromungsverfahrens

Aus den Betriebsmessungen (siehe Kap. 6.1) hat sich ergeben, dass mit einer maximalen Abwärmtemperatur von 550°C und einer maximalen Abwärmeleistung von rd. 2.100 kW_{th} zu rechnen ist. Die Schadstoff- und Staubbiladung des Abgases wies keine für ein nachgeschaltetes Verstromungsverfahren schädliche Konzentrationen auf. Das Abwärmeaufkommen ist aufgrund der Betriebsweise der Öfen stark diskontinuierlich.

Insgesamt ergaben sich folgende Randbedingungen zur Auswahl des Verstromungsverfahrens:

- Max. Abgastemperatur 550°C
- Max. Abwärmeleistung 2.100 kW_{th}
- Diskontinuierlicher Betrieb
- Guter Teillastbetrieb erforderlich
- Automatisches und schnelles Anfahren erforderlich
- Möglichst geringe Wartungskosten

Anhand der ermittelten Randbedingungen wurden ORC, Dampfturbine und Dampfmotor in Betracht gezogen. Im Vergleich der drei Verfahren fiel die Wahl letztendlich auf eine ORC-Anlage, da diese alle Anforderungen erfüllen konnte. Im Gegensatz dazu erweist sich eine Dampfturbine für die gestellten Anforderungen als nicht geeignet, da der Anfahrvorgang relativ lange dauert (teilweise über eine Stunde), die Wartungs- und Betriebskosten durch erforderliches spezialisiertes Personal recht hoch sind, eine Betrieb im Teillastbereich nur stark eingeschränkt möglich ist und immer eine Temperatur von rd. 450°C erforderlich ist, um Tröpfchenbildung in der Turbine zu vermeiden. Zudem ist der Aufwand für die erforderliche Peripherie (wie z. B. Dampferzeuger, Entsalzungsanlage, Speisewassertank, ...) deutlich höher als bei der ORC-Anlage. Der größte Nachteil eines Dampfmotors sind der relativ niedrige Wirkungsgrad im angestrebten Temperatur- und Leistungsbereich sowie eine ähnliche Peripherie, wie bei der Dampfturbine. Zudem ist bei einer ORC-Anlage aufgrund der geringeren thermischen und mechanischen Beanspruchung mit einer höheren Lebensdauer zu rechnen [23]. Ein zusammenfassender Vergleich der drei Verfahren findet sich auch in Tabelle 2.

Zum Zeitpunkt der Auswahl des Verstromungsverfahrens war noch davon auszugehen, dass 4 baugleiche Öfen an das Verstromungsverfahren angeschlossen werden. Im späteren Projektverlauf hat sich durch Änderung der Unternehmensziele von Grimm jedoch ergeben, dass nur 3 baugleiche Öfen und ein weiterer Ofen mit deutlich geringerer Leistung an das Abwärmeverstromungsverfahren angeschlossen wurden, so dass das Verstromungsverfahren letztendlich überdimensioniert ausgelegt wurde, da bei der letztendlich vorliegenden Konfiguration mit den Öfen 1, 3, 4 und 13 maximal nur rd. 1.700 kW_{th} an Abwärme vorliegen.

6.3.2 Technische Daten und Betriebsweise der ORC-Anlage

Basierend auf den o. g. technischen Randbedingungen wurden umfassende Gespräche mit verschiedenen ORC-Anlagen Herstellern geführt. Letztendlich fiel die Wahl auf eine

Anlage der Bosch KWK Systeme GmbH (ehemals Köhler & Ziegler). Die wichtigsten Leistungsdaten der ausgesuchten ORC-Anlage sind in **Tabelle 10** zusammengefasst.

Tabelle 10: Leistungsdaten der ORC-Anlage

Nutzbarer Abwärmestrom	2.129 kW _{th}
HT Kreis	135 – 108°C
Anzahl Turbinen	Max. 5 mit 75 kW _{el} z. Z. 4 Turbinen installiert
Elektrische Energie an den Generatorklemmen	max. 375 kW _{el}
Eigenbedarf der ORC-Aggregate (ohne Ventilatoren)	rd. 54 kW _{el}
Elektrische Garantieleistung	200 kW _{el}
Abgastemperatur Eintritt Wärmeübertrager	max. 550°C
Abgastemperatur Austritt Wärmeübertrager	rd. 250°C (min. 60°C)
Wirkungsgrad der ORC-Anlage	netto 12 – 14 %, brutto 15 %

6.3.3 Engineering zur Installation der ORC-Anlage

Im Vorfeld zur Installation der ORC-Anlage mussten hersteller- und betreiberseitig einige Auslegungs- und Planungsarbeiten durchgeführt werden:

- Vorüberlegungen haben ergeben, dass der Aufstellungsort für die ORC-Anlage vor der Halle „Hammerwerk“ erfolgen muss, da nur hier ausreichend Platz zur Verfügung steht.
- Die Abgasmengen der Schmiedeöfen sollten in einen gemeinsamen Abgassammelkanal aus Edelstahl mit Wärmedämmung zum Abgaswärmeübertrager der ORC-Anlage geführt werden. Der Transport der Abgase von max. 550°C sollte durch zwei, im Wechsel arbeitende Saugzugventilatoren mit einer Leistung von rd. 75 KW erfolgen.
- Die Abgasführung war so zu gestalten, dass bei einer Störung der ORC-Anlage das Abgas im Bypass direkt in den Kamin geleitet werden kann. Eine Umgehungsleitung mit direktem Anschluss an den Kamin sollte im Falle einer Störung oder Wartung am Wärmeübertrager den vollen Abzug der Abgase aus den Schmiedeöfen sicherstellen. Entsprechende By-Pass Leitungen mit Drosselklappen waren vorzusehen.
- Um die behördlich geforderten Schallwerte einzuhalten bzw. zu erreichen, wurde geplant, die Ventilatoren und den Abgaskamin mit Schalldämmhauben bzw. Kulissen-Schalldämpfern zu versehen und einzuhausen.
- Für die Messung des erzeugten Stromes wurde eine Wandlermessung mit Zähler im ORC-Container geplant. Die Einspeisung des erzeugten Stroms erfolgt über einen entsprechenden Schaltschrank und ein separates, hierfür ausgelegtes Kabel in die Trafostation der Fa. Grimm.

- Statische Berechnung zu den Fundamenten und der Stahlkonstruktion für die ORC-Anlage.
- Prüfstatik für Sonderbau.
- Einholen eines Schallschutzgutachtens zu erwarteten Geräuschemissionen.
- Fundamentarbeiten für den ORC-Container.
- Einhausung der Ventilatoren zur Minderung der zu erwartenden Schallimmissionen.
- Abklärung der Erfordernis von Baugenehmigungen und Gutachten zum Gewässerschutz.

6.3.4 Umbaumaßnahmen zur Installation der ORC-Anlage bei der Fa. Grimm

Die Umbaumaßnahmen zur Installation der ORC-Anlage mit allen Komponenten wurden Ende 2011 durchgeführt. Um die ORC-Anlage mit dem heißen Abgasstrom der vier Schmiedeöfen zu versorgen mussten temperaturbeständige Rohrleitungen, Regelklappen, ein Abgaskamin und Gebläse installiert werden. Des Weiteren war ein spezielles Fundament vor der Halle „Hammerwerk“ für die Aufstellung der ORC-Anlage erforderlich. Das Fundament musste ein Gesamtgewicht von rd. 60 t tragen und Erschütterungen seitens der in der Nachbarhalle arbeitenden 1.600 t Schmiedepresse, sowie des Gebläses sicher standhalten.

Bild 23 und **Bild 24** zeigen den Bau der Abgasführung der vier Schmiedeöfen aus der Halle „Hammerwerk“ mit Gasverteilung, Gebläse und Abgaskamin. Zur Sicherstellung einer kontinuierlichen Produktion wurden die Abgasgebläse redundant ausgeführt. Das heißt, ein Gebläse ist in Betrieb, fällt dieses aus, so übernimmt das zweite Gebläse die Funktion des ersten. Damit wird ein kontinuierlicher Abgasstrom in Richtung ORC-Anlage bzw. Abgaskamin sichergestellt. Aus Kostengründen wurden Gebläse ausgewählt, die nur für eine maximale Abgastemperatur von 380°C ausgelegt sind. Im Normalfall wird das heiße Abgas über die ORC-Anlage zum Abgaskamin geleitet, so dass die Gebläse mit einer Abgastemperatur von unter 250°C beaufschlagt werden. Bei Störung der ORC-Anlage würden die heißen Abgase direkt auf die Gebläse treffen. Daher wurde eine temperaturgeregelte Falschluffklappe installiert, die die Abgastemperatur zu den Gebläsen auf 380°C beschränkt.



Bild 23: Installation des Abgaskamins bei Grimm vor der Halle „Hammerwerk“



Bild 24: Abgasführung mit Hauptabgasleitung von den vier Schmiedeöfen aus der Halle „Hammerwerk“ und Gebläse mit Schallschutz (links) und Abgasführung mit Dämmung der heißen Rohrleitung inkl. Schallschutz (rechts)

Um den Abgasstrom der vier Schmiedeöfen auf einem hohen Temperaturniveau und mit möglichst geringem Druckverlust aus der Halle „Hammerwerk“ zu dem Aufstellungsort der ORC-Anlage zu führen, musste die Rohrleitungsführung in der Halle angepasst und die Leitungen gedämmt werden. In **Bild 25** ist die Rohrleitungsführung in der Halle beispielhaft dargestellt. Die Rohrleitungen haben eine Gesamtlänge von 24 m bei einem

Innendurchmesser von 630 – 1.400 mm und sind aufgrund der hohen Abgastemperatur von innen ausgemauert. Um den Abwärmeverlust weiter zu senken wurden die neuen Rohrleitungen von außen zusätzlich mit Steinwolle gedämmt.



Bild 25: Abgasführung (Dämmung der heißen Rohrleitung DN 630 – 1400 mm inkl. Schallschutz)

Im ersten Schritt wurden die Schmiedeöfen 3 und 4 an die Abgasleitung angeschlossen. Der Anschluss zwei weiterer Schmiedeöfen (1 und 13) erfolgte Anfang 2013 nach der Sanierung des Ofens 1 und des Neubaus des Ofens 13 (30-Zentner Ofen). **Bild 26** zeigt den Anschluss des Ofens 1 an die Abgassammelleitung sowie den 30-Zentner-Ofen mit der Abgasführung zur Abgassammelleitung.



Bild 26: Anschlussleitung des Ofens 1 (links) und Ansicht des 30-Zentner-Ofens (Ofen 13) mit Abgasleitung (rechts)

Neben dem Aufbau der Abgas- und Rohrleitungsführung erfolgte die Montage der erforderlichen MSR-Technik z. B. für die Regelklappe. Rohrleitungen, Regelklappen und Gebläse sowie diverse Kleinarmaturen wurden auf Funktion bzw. Dichtheit getestet. Anschließend konnte mit ersten Betriebstests begonnen werden. Die Betriebstests wurden im Bypassbetrieb erfolgreich durchgeführt. In **Bild 27** ist beispielhaft die Temperatur an den Gebläsen bei der Inbetriebnahme dargestellt. Ergebnis ist, dass die MSR-Technik gut funktioniert, da die Abgastemperatur an den Gebläsen die maximal zulässige Temperatur von 380°C nicht überschreitet.

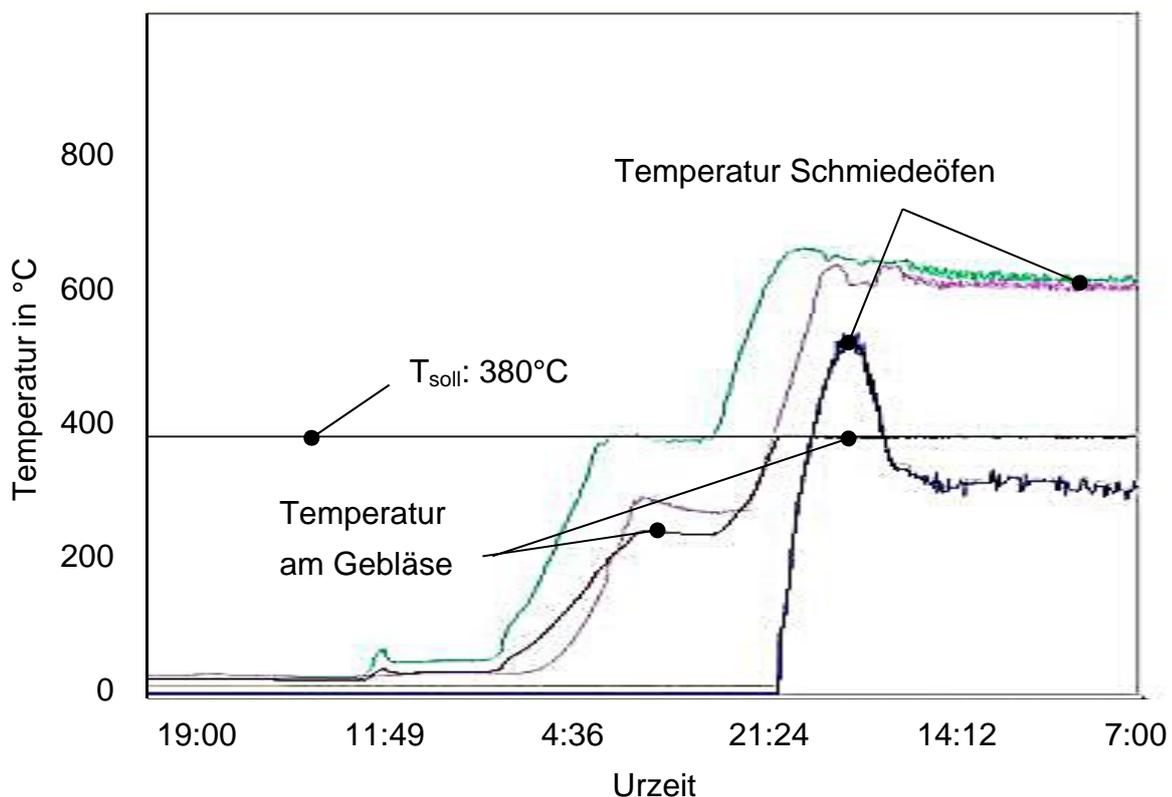


Bild 27: Temperaturmessungen an den Abgasgebläsen zur Überprüfung der MSR-Technik

Während des Betriebs der ORC-Anlage wurden weitere Messungen vorgenommen, die zeigen, dass die Abgastemperatur an den Gebläsen die maximal erlaubte Temperatur nicht überschreitet. In **Bild 28** ist die Temperatur des Abgases der Öfen 3 und 4 nach dem Rekuperator zur Brennluftvorwärmung und vor dem Abgasventilator für den November 2012 dargestellt.

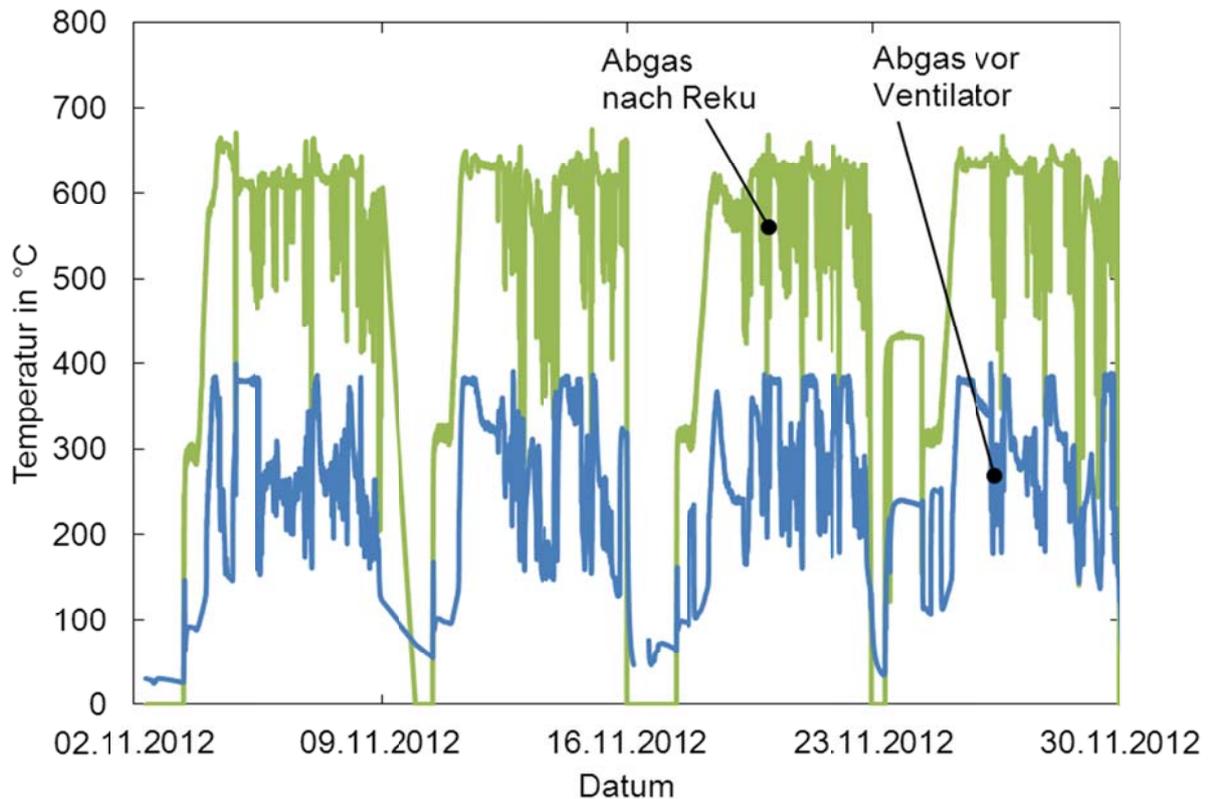


Bild 28: Abgastemperatur nach dem Rekuperator und vor dem Ventilator der Öfen 3 und 4

6.3.5 Inbetriebnahme der ORC-Anlage und Langzeituntersuchungen

6.3.5.1 Installation der ORC-Anlage bei der Fa. Grimm

Anfang 2012 wurden die Installationsarbeiten zur Abgasführung abgeschlossen, so dass mit dem Aufbau und Anschluss der ORC-Anlage begonnen werden konnte. Die ORC-Anlage des Typs Tubex 2000/245 befindet sich als Kompaktmodul in einem 12.192 x 3.000 x 3.000 mm abmessenden Container, der Ende Januar 2012 auf dem dafür vorbereiteten Fundament installiert wurde. Im Container befinden sich zwei Speisepumpen, Vorwärmer, Verdampfer, Überhitzer und vier Turbinen-Generator-Einheiten zu je 75 kW elektrischer Leistung, vgl. **Bild 29**. Die Schaltanlage mit dem Leitsystem ist innerhalb des Containers in einem separaten Raum untergebracht, vgl. **Bild 30**.

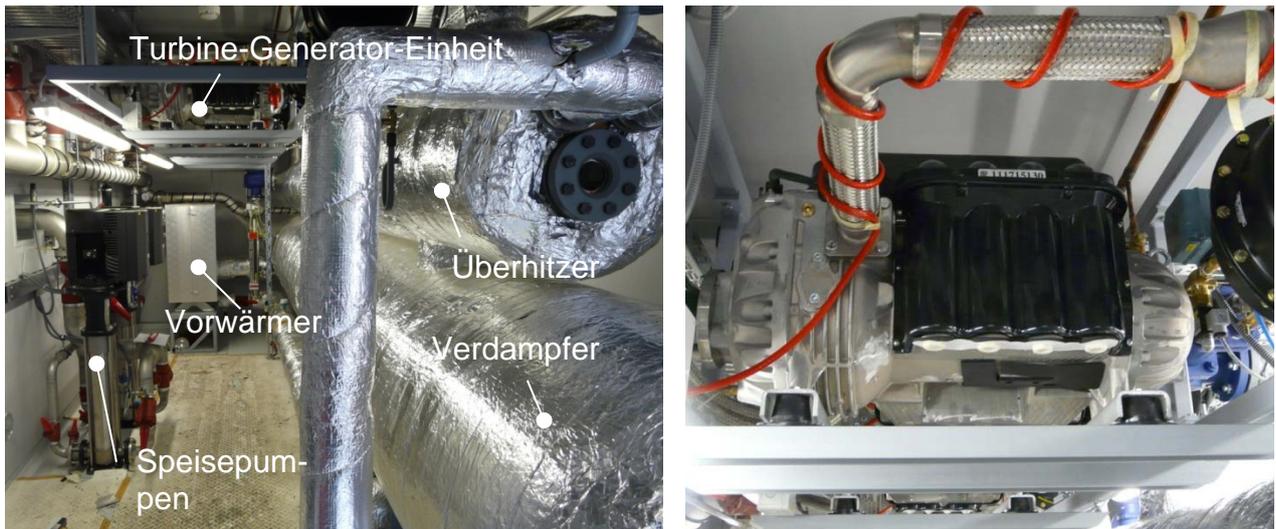


Bild 29: Innenansicht des Containers (links) sowie 75 kW-Turbine-Generator-Einheit (rechts)

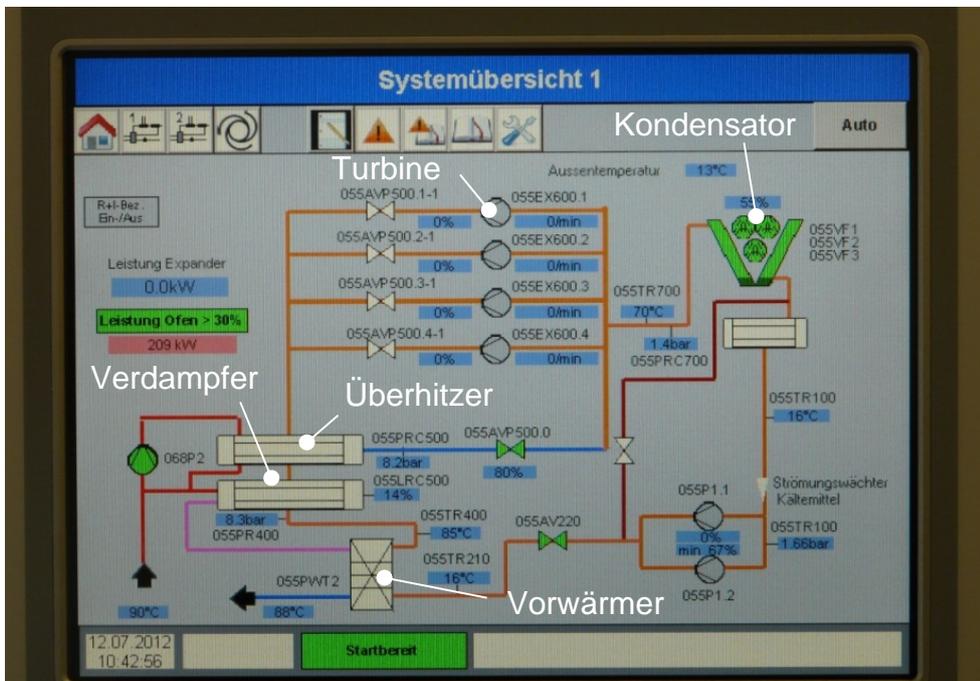


Bild 30: Installiertes Leitsystem der ORC Anlage

Die drei Kondensatoren zur Verflüssigung des Arbeitsmittels wurden auf dem Containerdach montiert. Abschließend wurde die Anlage an das Abgassystem und das Stromnetz angeschlossen. **Bild 31** zeigt die installierte ORC-Anlage und den Anschluss an die Abgasführung mit dem Abgaswärmeübertrager. Der Abgaswärmeübertrager ist als stehender Rohrbündel-Wärmeübertrager ausgeführt.



Bild 31: Außenansicht der ORC Anlage auf dem Werksgelände der Fa. Grimm (links) und des Abgaswärmeübertragers (rechts)

6.3.5.2 Inbetriebnahme der ORC-Anlage

Im März 2012 wurde die ORC-Anlage in Betrieb genommen. Insgesamt ergibt sich für die ORC-Anlage folgende Betriebsweise im Anlagenverbund bei Grimm, vgl. **Bild 32**.

Die Abgaswärme aus den Schmiedeöfen kann bis zu einer Leistung von 2.600 kW_{th} über einen Abgaswärmeübertrager auf den Heißwasser-Kreislauf übertragen werden. Im Abgaswärmeübertrager wird das Abgas von maximal 550°C auf ca. 160°C abgekühlt. Im Gegenstrom wird das Heißwasser von 110°C auf 136°C erwärmt und über den Hochtemperaturkreis in das ORC-Modul eingebunden. Im ORC-Kreislauf wird das Arbeitsmittel zunächst über die zwei Speisepumpen auf einen Druck von rd. 20 bar gebracht. Somit entfallen die erhöhten Auflagen der Dampfkesselverordnung. Eine Speisepumpe hält den Kreislauf konstant. Als Arbeitsmittel wird ein Kältemittel des Typs R245FA eingesetzt. Die Pumpen sind über Frequenzumrichter geregelt und passen sich der aktuellen Leistung an. Der Hochtemperaturkreis bedient einen Rohrbündelverdampfer mit Überhitzungsstufe. Dabei wird das Arbeitsmittel bei rd. 120°C verdampft und um wenige Grad überhitzt, um eine Tröpfchenbildung, die zur Zerstörung der Turbinen führen würde, zu vermeiden. Die Vorwärmung des Arbeitsmittels erfolgt über den Rücklauf des Hochtemperaturkreises. Ein Plattenwärmeübertrager erwärmt das Arbeitsmittel von rd. 28°C auf rd. 119°C. In den insgesamt 4 Turbinen-Generator-Einheiten (ausbaubar auf 5 Einheiten) wird das Arbeitsmedium schließlich von rd. 18 bar auf rd. 1 bar entspannt. Die Turbinen benötigen auf Grund der elektromagnetischen Lagerung kein Schmieröl.

Die Leistungsaufnahme der Kondensatoren wird geregelt und hängt im Wesentlichen von der Außentemperatur ab. Das Arbeitsmittel wird in den Kondensatoren auf rd. 27°C abgekühlt. Dabei beträgt die Leistungsaufnahme im Auslegungsfall rd. 18 kW. Die maximale elektrische Leistung der ORC Anlage beträgt z. Z. 4 x 75 kW und ist erweiterbar auf 5 x 75 kW. Gesteuert wird die ORC Anlage über die Schalt- und Steueranlage aus dem sich jederzeit der Betriebszustand der Anlage erkennen und regeln lässt.

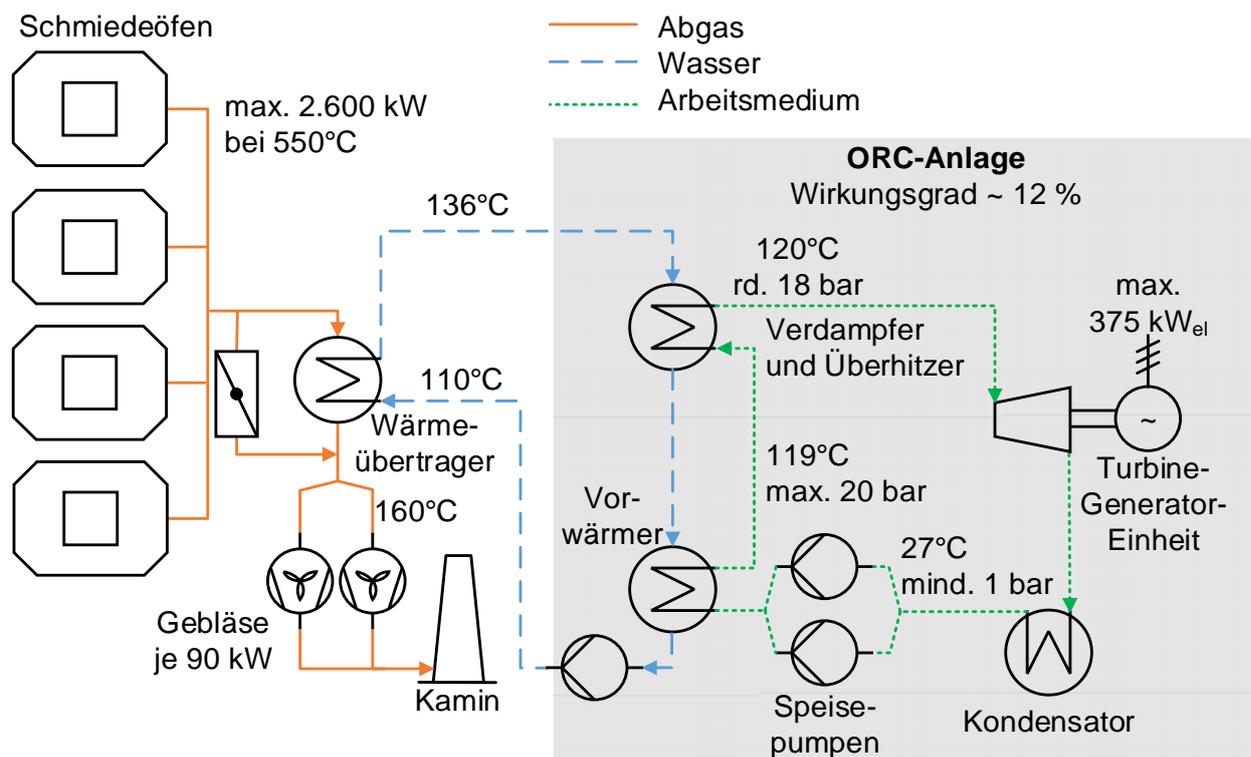


Bild 32: Verfahrensschaubild der ORC-Anlage

Nach der Inbetriebnahme traten verschiedene Störungen auf, die einen kontinuierlichen Betrieb der ORC Anlage bis Ende 2013 weitestgehend verhinderten. Im Einzelnen waren dies:

1. Zweifacher Ausfall einer Speisepumpe im Kältemittelkreislauf. Dies hatte jeweils mehrwöchige Anlagenstillstände zur Folge, da entsprechende Ersatzpumpen nicht vorrätig und kurzfristig lieferbar waren. Die Pumpenkennlinie wurde nach dem zweiten Ausfall angepasst. Die falsche Pumpenkennlinie vor dem Austausch war vermutlich eine der Ursachen für den Pumpenausfall.
2. Auf Grund eines Ausfalls der Schalt- und Steueranlage für Automatik, Sicherheitssystem und Leistungsteil musste die SPS-Steuerung komplett ausgetauscht werden.
3. In den Abgaswärmeübertrager war trotz geschlossener Abgasklappen des Bypasses noch zu viel Restwärme gelangt, so dass ein Ausfall der Anlage durch eine zu hohe Temperatur im Heißwasserkreislauf durch Abschalten des Sicherheitstempera-

turbegrenzers die Folge war. Die Ursache war eine nicht eingebaute, aber vorgesehene Abgasklappe im Rücklauf des Abgaswärmeübertragers, die nachgerüstet wurde. Als Folge der Störabschaltung der ORC-Anlage wurden durch eine verlängerte Sicherheitskette die angeschlossenen Öfen 3 und 4 ebenfalls abgeschaltet, was eine Störung des Produktionsbetriebs nach sich zog. Zur Sicherung der Produktion wurde zunächst eine Übergangslösung vorab installiert bevor die Änderung der Sicherheitskette vorgenommen wurde.

4. Der Kältemittelkreislauf war durch Rostablagerungen im System verunreinigt. Dadurch setzten sich die Feinfilter vor den Turbinen in unregelmäßigen Abständen zu, was zu Abschaltungen der ORC-Anlage führt. Während der Projektlaufzeit haben die Rostablagerungen deutlich abgenommen.
5. Im Stellmotor der Bypassklappe in der Abgassammelleitung kam es durch Regenwassereintrag zu einem Kurzschluss. Das Problem konnte durch Installation einer Schutzhaube beseitigt werden.
6. Die Abgassammelleitung und der Kompensator in der Abgassammelleitung vor dem Wärmeübertrager wiesen Ende 2012 Beschädigungen auf, vgl. **Bild 33**. Die Ursache für die Schäden konnte nicht geklärt werden. Die Abgassammelleitung und der Kompensator wurden umgehend repariert.



Bild 33: Beschädigung der Abgassammelleitung (links) und des Kompensators in der Abgassammelleitung (rechts)

7. Die Kaskadenschaltung der ORC-Anlage funktionierte nach der Inbetriebnahme nicht. Die Programmierung beinhaltete nicht das automatische Zuschalten von Turbinen, wenn eine Turbine auf Volllast läuft. Dadurch war zunächst nur der Betrieb mit einer Turbine möglich. Das Problem konnte Ende 2013 durch Installation einer neuen Software behoben werden.

8. Die ORC-Anlage musste in Folge eines Kältemittelverlustes von Mitte Dezember 2012 bis April 2013 stillgelegt werden. Das Kältemittel musste aufgrund des Verlusts ausgetauscht werden. Durch die niedrige Außentemperatur zu dieser Zeit sammelte sich das Kältemittel jedoch in den oberen Bereichen der Verflüssiger und konnte nur schwer und zeitweise gar nicht abgepumpt werden. Dadurch dauerte die Prozedur bis April 2013.
9. Ende 2012 traten diverse Undichtigkeiten an Flanschverbindungen durch lockere Schraubverbindungen auf. Die Schraubverbindungen wurden nachgezogen.
10. Von Januar bis Mitte April 2013 erfolgten wiederholt Abschaltungen der ORC-Anlage durch den Sicherheits-Temperatur-Begrenzer (STB). Ursache waren Wassermangel und Kältemittelverlust. Die Versuche von Bosch KWK (Hersteller) zur Ursachenfindung und Behebung der Mängel zogen sich über mehrere Wochen hin, so dass die Anlage erst Anfang April 2013 wieder störungsfrei laufen konnte.
11. Die Turbine 2 war defekt und musste Ende Juni 2013 ausgetauscht werden.

Zur Verbesserung des Betriebs der ORC-Anlage wurden seitens der Fa. Grimm folgende zusätzliche Maßnahmen umgesetzt:

- Eine Datenfernübertragung wurde mit Hilfe der Fa. Bosch KWK eingerichtet, um schneller und online auf die Betriebsdaten der ORC-Anlage zugreifen zu können.
- Zudem wurde die Ausgabe eines Analogsignals, das die Leistung der angeschlossenen Öfen im Bereich von 0 – 100 % anzeigt, eingerichtet. Zusammen mit einem neu angeschafften Messgerät zur Gasmengenmessung (mit digitaler Fernanzeige) lässt sich mittels einer Berechnungsroutine der Wärmestrom des Abgases bestimmen. Damit ist es der Fa. Grimm als Betreiber besser möglich den Wirkungsgrad des ORC-Prozesses zu ermitteln, mit den Daten des ORC-Anlagenherstellers abzugleichen und evtl. Schwachstellen/Wärmeverluste im System aufzudecken.
- Zur Vermeidung einer unzulässigen Aufheizung des Wasserkreislaufs der ORC-Anlage und damit von Störungen im Bypass-Betrieb wurde zum einen eine weitere Abgasklappe (DN 500) vor dem unteren Abgasflansch des Abgaswärmeübertragers eingebaut und zum anderen ein STB (vom TÜV gefordert), der die Temperatur im Heißwasserkreislauf auf 130°C begrenzt.

6.3.5.3 Betrieb der ORC-Anlage

Von Mitte Oktober 2012 bis Ende November 2012 konnte für einen Zeitraum von rd. 6 Wochen ein erster weitestgehend kontinuierlicher Betrieb der ORC-Anlage mit einer Turbine erreicht werden. **Bild 34** und **Bild 35** zeigen die Stromerzeugung und die Leistungsabgabe des Abgases über den Wärmeübertrager der ORC-Anlage für den November 2012 bzw. eine Woche im November 2012. Die Leistungsabgabe des Abgases im Wärmeübertrager auf das Arbeitsfluid der ORC-Anlage liegt durchschnittlich bei $400 \text{ kW}_{\text{th}}$. Die netto Stromerzeugung, d. h. abzüglich des Eigenbedarfs, der ORC-Anlage beträgt rd. $20 \text{ kW}_{\text{el}}$. Unter Berücksichtigung eines Eigenbedarfs der ORC-Anlage von rd. 30 bis $40 \text{ kW}_{\text{el}}$ ergibt sich daraus ein elektrischer Wirkungsgrad der ORC-Anlage von rd. 14 %.

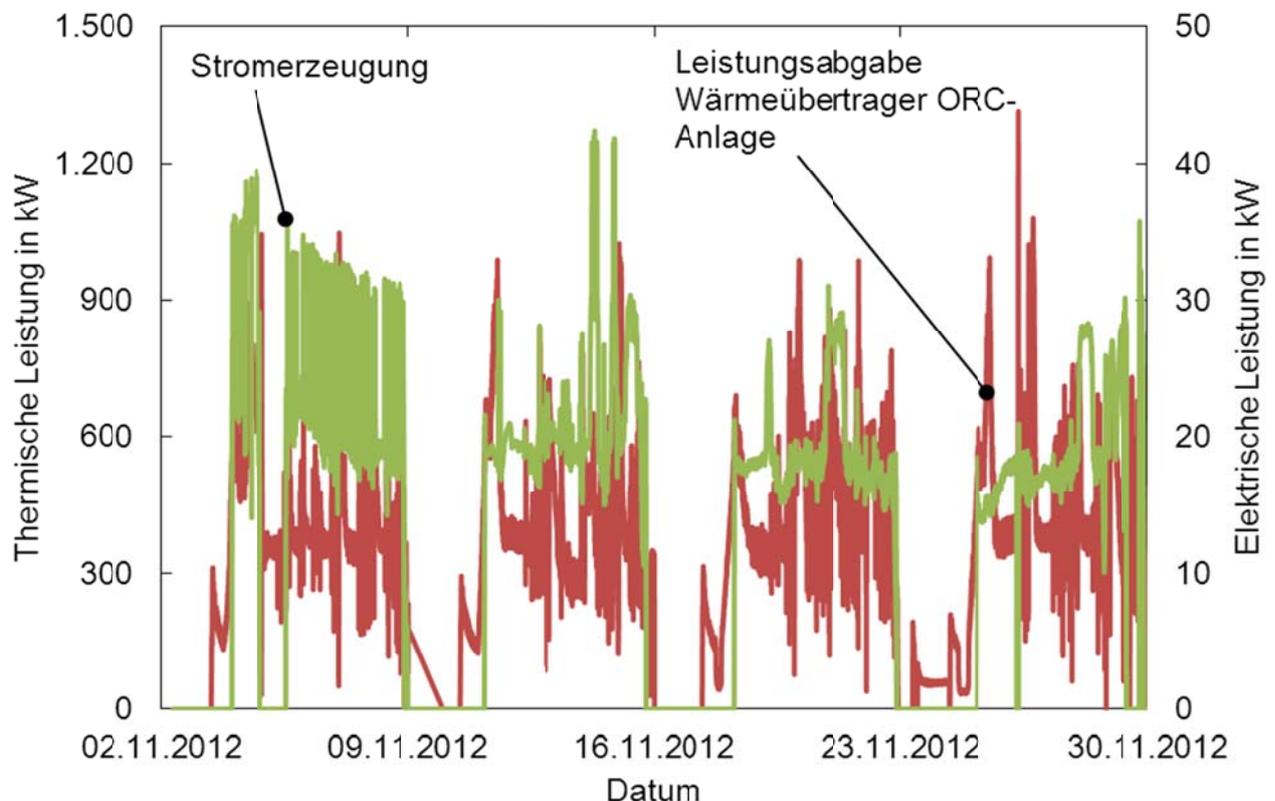


Bild 34: Thermische Leistungsabgabe über den Wärmeübertrager der ORC-Anlage und daraus resultierende Stromproduktion bei angeschlossenen Öfen 3 und 4

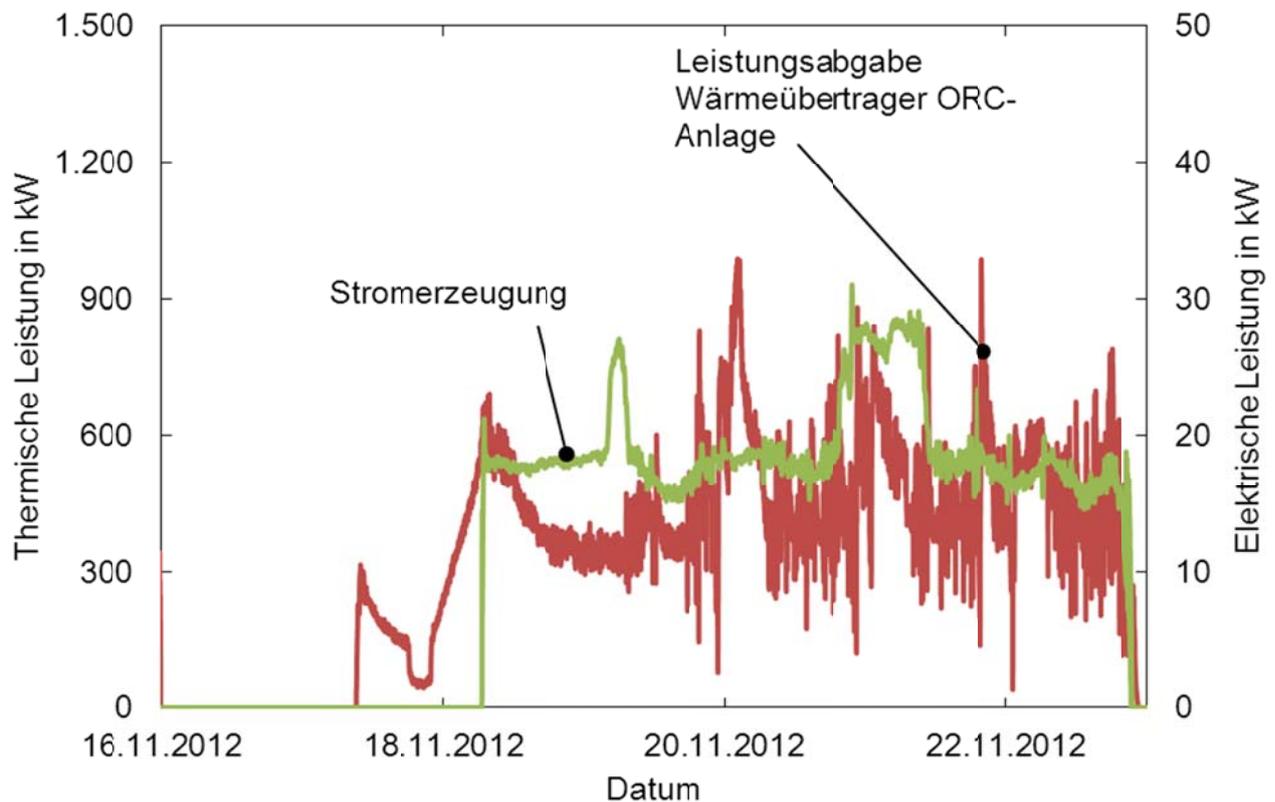


Bild 35: Thermische Leistungsabgabe über den Wärmeübertrager der ORC-Anlage und daraus resultierende Stromproduktion für eine Woche bei angeschlossenen Öfen 3 und 4

Aufgrund weiterer Störungen, siehe auch Kap. 6.3.5.2, konnte in der Folgezeit kein kontinuierlicher Betrieb der Anlage bis Ende 2013 erreicht werden. Insgesamt ergab sich für das Jahr 2012 nur eine sehr geringe Betriebszeit der ORC-Anlage von rd. 1.000 Stunden. Insbesondere Störungen bei der Kaskadenschaltung der Turbinen verhinderten dazu eine optimale Ausnutzung des Abwärmestroms, so dass maximal eine Turbine betrieben werden konnte. Daraus ergab sich für das Jahr 2012 nur eine Stromproduktion von rd. 20.000 kWh, die jedoch vom Eigenbedarf der ORC-Anlage mehr als aufgebraucht wurde. Vom Januar bis März 2013 stand die Anlage aufgrund verschiedener Betriebsstörungen (insbesondere Leckagen im Kältemittelkreislauf) weitestgehend still. Insgesamt wurde die ORC-Anlage über das Jahr 2013 rd. 2.600 Stunden betrieben was rd. 30 % der Jahresstunden entspricht. Die elektrische Leistung der ORC-Anlage war aufgrund der immer noch nicht einwandfrei funktionierenden Kaskadenschaltung weitestgehend auf den Betrieb einer Turbine begrenzt, so dass sich für 2013 eine Nettostromproduktion von rd. 63.000 kWh ergab. Seit Januar 2014 konnte die Betriebszeit der ORC-Anlage deutlich erhöht werden. Auch die elektrische Leistung erhöhte sich mit der jetzt einsatzbereiten Kaskadenschaltung der Turbinen. Insgesamt wurde 2014 bis einschließlich Juli eine Nettostromproduktion von rd. 156.000 kWh erreicht bei einer zeitlichen Auslastung von rd. 50 %. Die genannten Daten sind in **Tabelle 11** zusammengefasst.

Tabelle 11: Bisherige Betriebsergebnisse der ORC-Anlage

Zeitraum	Betriebszeit in h	Zeitliche Auslastung in %	Stromproduktion brutto in kWh	Stromeigenbedarf in kWh	Stromproduktion netto in kWh
Apr.–Dez. 2012	1.045	14,2	20.648	40.510	- 19.862
Jan.–Dez. 2013	2.644	30,2	100.680	37.430	63.250
Jan.–Jul. 2014	2.562	50,3	165.942	9.441	156.501

Trotz der deutlichen Erhöhung der Betriebsstunden und der Stromproduktion der ORC-Anlage gibt es auch jetzt noch Betriebsstörungen, die den Betrieb der Anlage beeinträchtigen. Zudem waren bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt, aufgrund von Ofenrevisionen nie alle 4 angeschlossenen Öfen in Betrieb, so dass die maximal mögliche Abwärme bislang nicht zur Verfügung stand. **Bild 36** bis **Bild 38** zeigen die monatliche Betriebszeit der ORC-Anlage (Bild 36), die Stromproduktion und den Eigenbedarf (Bild 37) sowie die elektrische Erzeugungs- und Eigenverbrauchsleistung (Bild 38) der Anlage. Es zeigt sich, dass im Mai 2014 die Stromproduktion aufgrund von Betriebsstörungen im Vergleich zu den Vormonaten deutlich zurückgegangen ist und sich auch die elektrische Leistung der Anlage verringert hat, was auf Fehler in der Kaskadenschaltung hindeutet. Insgesamt ist aus den drei Bildern aber zu erkennen, dass der Betrieb der ORC-Anlage seit Anfang 2014 deutlich stabiler ist. Zudem konnte dadurch infolge seltenerer An- und Abfahrvorgänge der Eigenverbrauch der Anlage deutlich gesenkt werden. Die elektrische Maximalleistung der Anlage lag bislang bei rd. 140 kW Anfang 2014. Hier zeigt sich, dass die Anlage mit einer möglichen elektrischen Leistung von 300 kW aufgrund der schon erläuterten Umstände überdimensioniert ausgelegt worden ist.

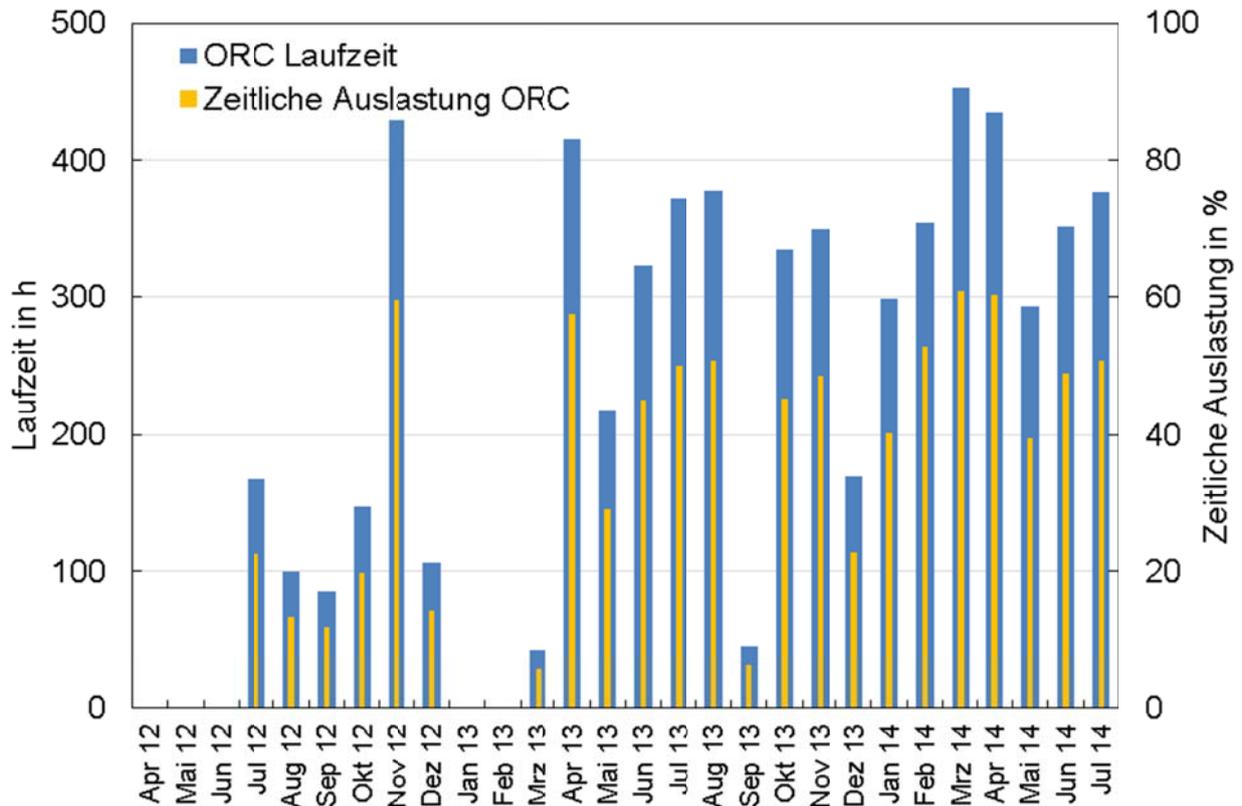


Bild 36: Laufzeit und zeitliche Auslastung der ORC-Anlage seit der Inbetriebnahme 2012

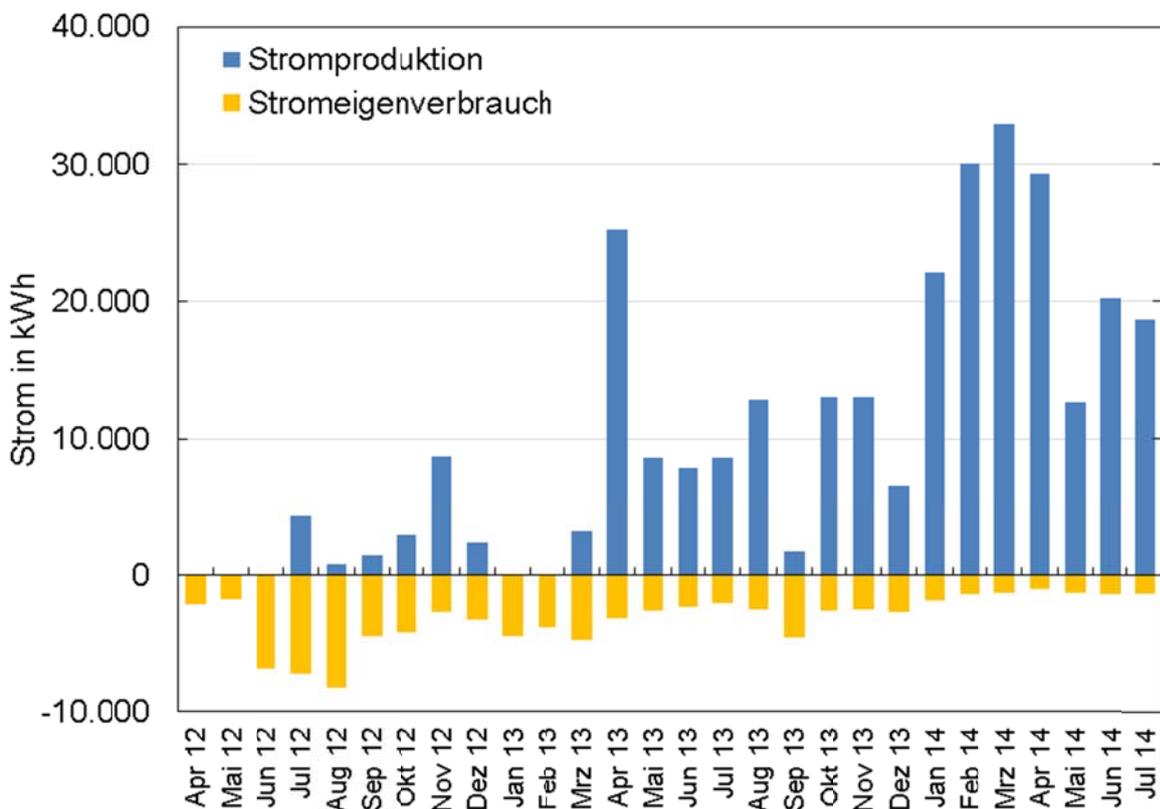


Bild 37: Stromproduktion und Eigenverbrauch der ORC-Anlage seit der Inbetriebnahme 2012

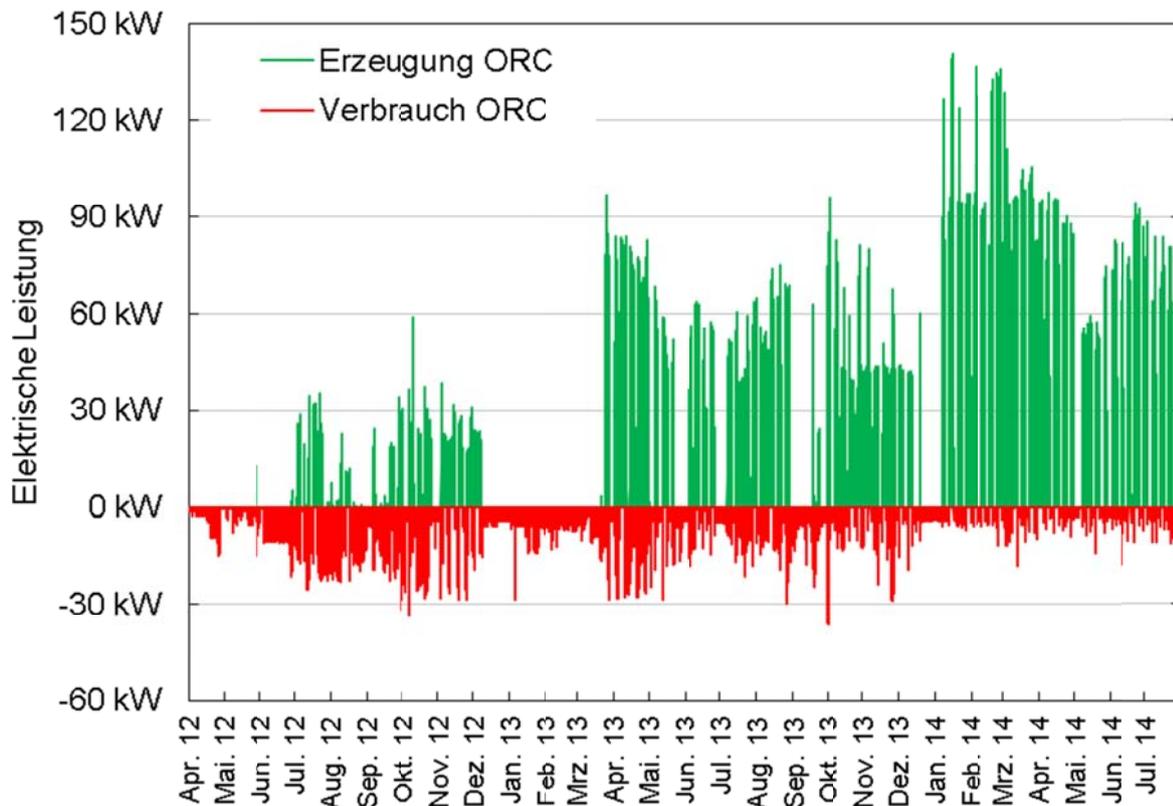


Bild 38: Elektrische Erzeugungs- und Eigenverbrauchsleistung der ORC-Anlage seit der Inbetriebnahme 2012

6.3.5.4 Bewertung des Betriebs der ORC-Anlage

Bis zur Installation der ORC-Anlage waren einige Umbaumaßnahmen vorzunehmen, von der Anpassung der Abgasleitungsführung über neue Abgasgebläse und Regelungen bis hin zu Fundamentarbeiten für den ORC-Container. Nach der Inbetriebnahme der ORC-Anlage traten erhebliche Störungen auf, die einen kontinuierlichen Betrieb der ORC-Anlage verhinderten oder nur den Betrieb mit einer Turbine erlaubten. Dadurch konnte kein durchgehend kontinuierlicher Betrieb der Anlage bis Ende 2013 erreicht werden. Nachdem die Störungen Ende 2013 / Anfang 2014 weitestgehend beseitigt werden konnten und auch der automatische Betrieb mit mehreren Turbinen über eine Kaskadenschaltung möglich wurde, stellte sich ein weitestgehend kontinuierlicher Betrieb ein. Während dieser Zeit hat sich auch der Eigenverbrauch infolge der selteneren An- und Abfahrvorgänge deutlich verringert und somit die Nettostromausbeute zusätzlich erhöht. Bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt waren aufgrund von Ofenrevisionen nie alle 4 angeschlossenen Öfen in Betrieb, so dass die maximal mögliche Abwärme bislang nicht zur Verfügung stand und maximal 2 Turbinen gleichzeitig betrieben werden konnten.

Aufgrund der geringeren Abwärmeleistung der angeschlossenen Schmiedeofen (infolge der Änderung der Unternehmensziele der Fa. Grimm, vgl. Kap. 6.1.1) als die bei der

Auslegung der ORC-Anlage zu Grunde gelegte, wurde die ORC-Anlage überdimensioniert ausgelegt. Daraus ergibt sich, dass z. Z. maximal ein Betrieb der ORC-Anlage mit drei der vier Turbinen möglich ist. Der Anschluss weiterer Öfen zur Erhöhung des Abwärmepotentials bietet sich aufgrund der hohen Kosten für den erforderlichen Leitungsbau und die geringe Leistung der noch verfügbaren Öfen z. Z. nicht an. Derzeit wird die Einbindung von BHKW-Abwärme in die ORC-Anlage geprüft, siehe auch Kap. 6.4.1.

6.4 Technisch-wirtschaftliche Bewertung

Abschließend waren eine technische und wirtschaftliche Gesamtbewertung der ORC-Anlage durchzuführen sowie Umsetzungsmöglichkeiten für andere Thermoprozessanlagen darzustellen, siehe **Tabelle 12**.

Tabelle 12: Übersicht der Arbeiten und Ergebnisse zur technisch-wirtschaftlichen Bewertung

Zugehörige Arbeitsschritte AS 12 und 13
<p>Ziele</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bewertung der umgesetzten Anlage bezüglich technischer und wirtschaftlicher Aspekte sowie Klimaschutzaspekten • Vergleich mit anderen Verstromungssystemen • Anwendungskonzepte zur Umsetzung einer Abwärmeverstromung an Thermoprozessanlagen verschiedener Industriebereiche
<p>Durchgeführte Arbeiten</p> <ul style="list-style-type: none"> • Berechnung und Bewertung der Wirtschaftlichkeit • Technische Bewertung • Ermittlung klimaschutzrelevanter Aspekte • Leitfaden zur Umsetzung an anderen Thermoprozessanlagen
<p>Ergebnisse</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gesamte Nettostromproduktion bis einschließlich Juli 2014 rd. 200.000 kWh • Bislang erreichte CO₂-Einsparung rd. 120.000 kg • Zu erwartende Amortisationszeit der ORC-Anlage je nach Strompreis zwischen 7,5 und 19,5 Jahren • Maximal zu erwartende CO₂-Einsparung während der anzunehmenden Laufzeit von 20 Jahren rd. 11.400 t • Bei diskontinuierlichem Betrieb ist bei einer ORC-Anlage im Vergleich zu Dampfturbine, Dampfmotor und TEG mit der kürzesten Amortisationszeit zu rechnen • Die Wirtschaftlichkeit einer Abwärmeverstromung wird wesentlich von den Stromkosten des Anwenders beeinflusst • Nur in seltenen Fällen ist bei einer Abwärmeverstromung mit heutzutage oft üblichen geforderten Amortisationszeit von unter 4 Jahren zu rechnen • Über die gesamte Lebensdauer einer Verstromungsanlage ist die Wirtschaftlichkeit jedoch zumeist gegeben

6.4.1 Technisch-wirtschaftliche Bewertung und Klimaschutzaspekte

Der bisherige Betrieb der ORC-Anlage ergab bis einschließlich Juli 2014 eine Nettostromproduktion von rd. 200.000 kWh bei rd. 6.300 Betriebsstunden der ORC-Anlage. Da der produzierte Strom einen Teil des Eigenbedarfs der Fa. Grimm abdeckt, muss dieser nicht extern bezogen werden. Der mit der ORC-Anlage produzierte Strom wird aus einer vorhandenen, ansonsten nicht genutzten Energiequelle (Abgasabwärme) erzeugt, so dass sich daraus direkt auch eine Primärenergieeinsparung in gleicher Höhe entsprechend des deutschen Strommixes ergibt, der zu rund 55 % aus fossilen Energieträgern erzeugt wird, vgl. **Bild 39**.

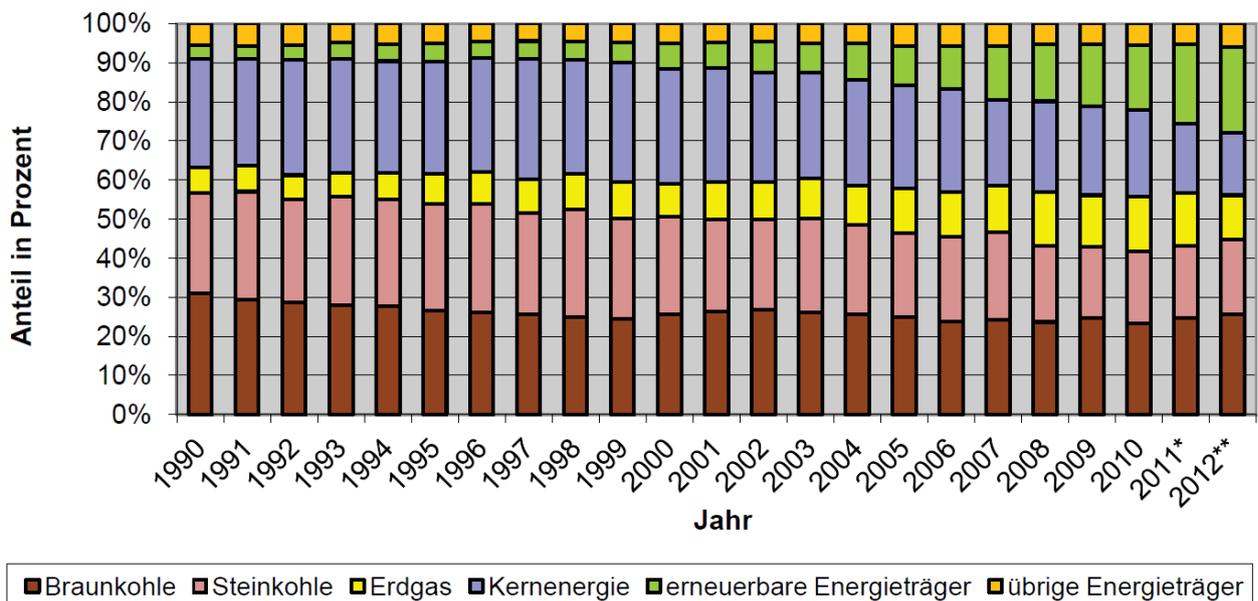


Bild 39: Anteil der Energieträger an der Bruttostromerzeugung -- „Deutscher Strommix“ [22]

Aus dem CO₂-Äquivalent des deutschen Strommixes von 601 g_{CO2}/kWh (für 2012) [22] ergibt sich eine Verringerung der klimarelevanten Emissionen von rd. 120.000 kg bislang.

Anhand der bisherigen Betriebsdaten lässt aufgrund der zahlreichen Betriebsstörungen nur schwer auf die Wirtschaftlichkeit und den zukünftigen Betrieb der ORC-Anlage schließen. Dies zeigt sich auch in den erheblichen Verbesserungen im Betrieb der Anlage seit Ende 2013. Ausgehend von den in Kap. 6.3.5.4 genannten weiteren Verbesserungspotentialen müssen für die Wirtschaftlichkeitsabschätzung einige Annahmen getroffen werden.

Für den diskontinuierlichen Betrieb werden Stillstände von 1,5 Tagen pro Woche und zusätzlich 2 Wochen für Ofenrevisionen angenommen. Für den Betrieb der Öfen wird weiterhin angenommen, dass nur zu 35 % der Laufzeit Volllast anliegt, zu 35 % der Zeit rd. 67 % Last gefahren werden und die restlichen 35 % der Laufzeit nur 50 % der Maxi-

malleistung erreicht werden. Die maximale der ORC-Anlage von den vier angeschlossenen Öfen zur Verfügung gestellte Abwärmeleistung beträgt rd. 1.700 kW_{th}. Diese und weitere Randbedingungen wie Preissteigerung und Zinssatz sind in **Tabelle 13** zusammengefasst.

Tabelle 13: Randbedingungen für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Mittlerer Abwärmestrom	1,7 MW _{th}
Volllast	2.293 h/a
Teillast	2.603 h/a
Preissteigerung	3 %
Abschreibungszeit	15 Jahre
Nutzungsdauer	20 Jahre
Zinssatz	6 %

Aus der Variation des Strompreises zwischen 10 und 20 ct/kWh bei den genannten Randbedingungen ergibt sich eine Amortisationszeit der ORC-Anlage von rd. 7,5 bis 19,5 Jahren. Wäre die ORC-Anlage für den tatsächlich vorliegenden Abwärmestrom von maximal 1.700 kW_{th} ausgelegt worden, so würde sich die Amortisationszeit jeweils um rd. 1 Jahr verringern aufgrund der geringeren Investitionskosten, siehe **Bild 40**.

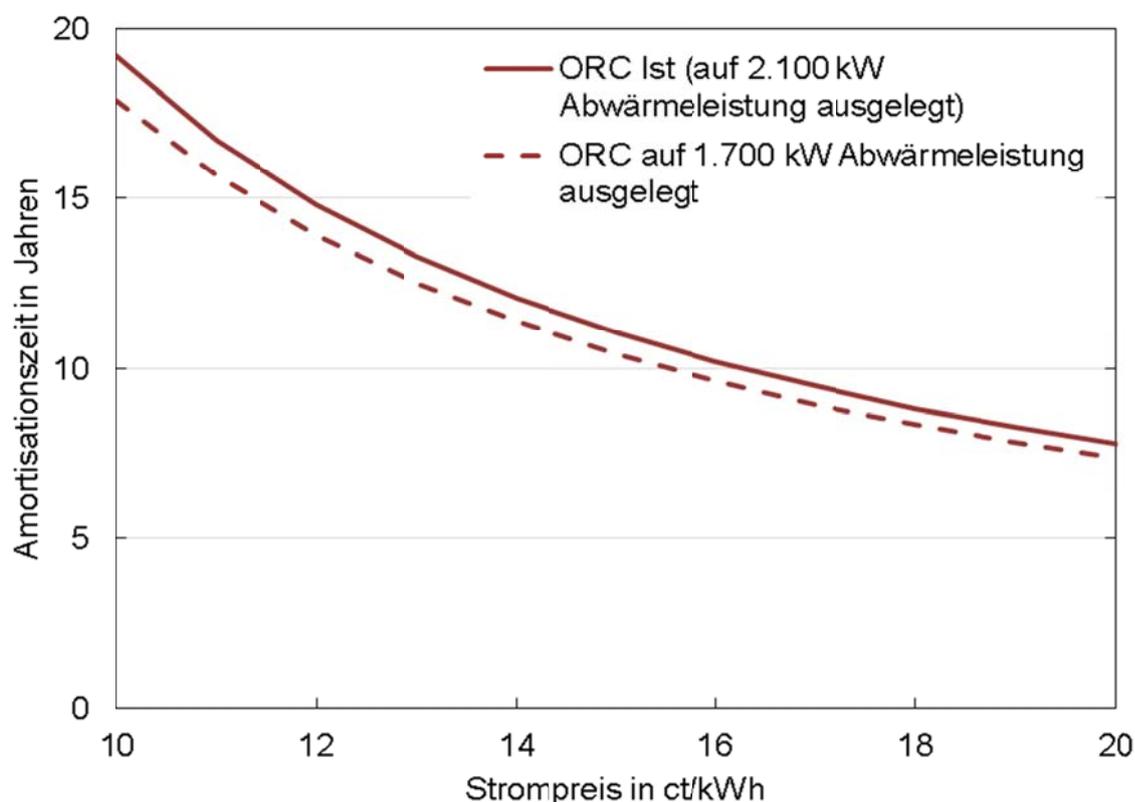


Bild 40: Abschätzung der Amortisationszeit der ORC-Anlage

Die Laufzeit der ORC-Anlage kann mit bis zu 20 Jahren angenommen werden. Aus den genannten Randbedingungen ergibt sich eine maximal zu erwartende Stromproduktion

von rd. 950.000 kWh/a. Daraus resultiert eine mögliche CO₂-Einsparung von 570 t/a. Insgesamt können über die Laufzeit der ORC-Anlage von 20 Jahren rd. 11.400 t CO₂ eingespart werden.

Zur Bewertung der ORC-Technologie im Vergleich mit anderen Verstromungsverfahren wurde eine technisch-wirtschaftlichen Gesamtbewertung des Systems durchgeführt. Es wurde die Abwärmeverstromung entsprechend der in Kap. 0 vorgestellten Verfahren mittels ORC-Prozess, Dampfturbine und Dampfmotor betrachtet. Zusätzlich wurde noch die Abwärmeverstromung mittels thermoelektrischer Generatoren (TEG) in die Betrachtungen einbezogen, da auf diesem Gebiet in den letzten Jahren die Forschungsaktivitäten stark zugenommen haben und TEG eine vielversprechende Alternative zu den herkömmlichen Verfahren sein können.

TEG arbeiten nach dem Seebeck-Effekt. Gemäß dem Seebeck-Effekt, entsteht in einem Stromkreis aus zwei verschiedenen elektrischen Leitern bei einer Temperaturdifferenz zwischen den Kontaktstellen eine elektrische Spannung in Abhängigkeit der Höhe der Temperaturdifferenz und der materialabhängigen Seebeck-Koeffizienten.

In einzelnen Applikationen haben sich TEG bereits eine Marktlücke erobert, z. B. bei autarken Sensoren. Die Nutzung in einem industriellen Großeinsatz ist jedoch bislang noch nicht umgesetzt worden [24], [25], [26]. Hauptforschungsgebiet sind z. Z. neue Materialien zur Entwicklung von TEG zur Nutzung von Hochtemperaturabwärme, um u. a. die Abwärmeverstromung mittels TEG in der Industrie wirtschaftlicher zu gestalten [27], [28], [29]. TEG für ein Temperaturniveau von bis zu 600°C wurden schon erfolgreich im Automobilbereich erprobt und werden z. Z. für den großindustriellen Bereich entwickelt.

Das nutzbare Temperaturniveau liegt bei 70 bis 600°C, der elektrische Wirkungsgrad beträgt rd. 5 %. Die Anfahrzeit von TEG ist sehr gering, da mit Anlegen der Temperaturdifferenz Strom erzeugt wird. Dadurch ist ein diskontinuierlicher Betrieb sehr gut möglich.

TEG benötigen keine beweglichen Teile und Arbeitsfluide. Durch die kompakte Bauweise können TEG auf kleinsten Flächen installiert werden oder in großer Zahl zu einem Großmodul zusammengefasst werden. Zusätzlich erforderliche Anlagenkomponenten sind die Wasserkühlung der TEG und der elektrische Anschluss an das Werksnetz. Dadurch gibt es für den Einbau von TEG weniger bauliche Beschränkungen als für andere komplexe technische Lösungen der Abwärmeverstromung.

Die spezifischen Investitionskosten für industrielle Anwendungen der TEG betragen z. Z. noch über 5.000 €/kW_{el}, da es sich um Prototypen handelt. Inkl. der Peripherie können sich die Investitionskosten auf über 7.000 €/kW_{el} erhöhen. Zielgröße für die spezifischen

Investitionskosten sind rd. 2.000 - 3.000 €/kW_{el}, die aufgrund einer möglichen Massenproduktion und des Einsatzes neuer kostengünstigerer Materialien mittelfristig auch realistisch erscheinen. Die Betriebs- und Wartungskosten sind aufgrund des einfachen Aufbaus sehr gering.

Die wichtigsten Daten der anderen betrachteten Verstromungsverfahren sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Zur Beurteilung der verschiedenen Verfahren wurden zwei Szenarien betrachtet:

Szenario 1: Kontinuierliches Abwärmeaufkommen.

Szenario 2: Diskontinuierliches Abwärmeaufkommen.

In **Tabelle 14** sind die Randbedingungen der beiden Szenarien zusammengefasst.

Tabelle 14: Randbedingungen der beiden betrachteten Szenarien

Randbedingung	Szenario 1	Szenario 2
Abgastemperatur	500 – 600°C	500 – 600°C
Mittlerer Abwärmestrom *	1,7 MW _{th}	1,7 MW _{th}
Volllast	7.752 h/a **	2.293 h/a ***
Teillast	-	bis zu 3.865 h/a ***
Strompreis zu Beginn	13 ct/kWh	13 ct/kWh
Preissteigerung	3 %	3 %
Abschreibungszeit	15 Jahre	15 Jahre
Nutzungsdauer	20 Jahre	20 Jahre
Zinssatz	6 %	6 %

* Verstromungsanlagen nach mittlerem Abwärmestrom ausgelegt

** keine Wochenendstillstände, 6 Wochen Revisionsstillstand pro Jahr ohne Abwärmestrom → 7.752 h Volllaststunden pro Jahr

*** inkl. Wochenend- und Revisionsstillständen → 2.293 h Volllaststunden pro Jahr, bis zu 3.865 h Teillaststunden pro Jahr (je nach Möglichkeit das Verstromungsverfahren im Teillastbetrieb zu betreiben)

Zur Beurteilung der Verstromungsverfahren wurden die Amortisationszeit und die maximal mögliche Stromproduktion pro Jahr berechnet. Die Ergebnisse sind in **Bild 41** und **Bild 42** dargestellt. Bei den berechneten Werten handelt es sich um Idealwerte. D. h. es wurden z. B. keine Betriebsstörungen in die Betrachtung mit einbezogen. Zudem wurde davon ausgegangen, dass der gesamte erzeugte Strom im Werk abgenommen wird und somit den Strombezug des Werks vom Energieversorger verringert. Sollte nicht der ganze Strom im Werk abgenommen werden können, z. B. durch eine zeitliche Diskrepanz zwischen Strombedarf und Abwärmeaufkommen, müsste eine wirtschaftlich ungünstigere Einspeisung in das öffentliche Stromnetz erfolgen. Bei einer Einspeisung des

erzeugten Stromes in das öffentliche Stromnetz wird der Strom vom Energieversorger nur entsprechend dem aktuellen Preis an der Strombörse vergütet, der z. Z. bei rd. 4 - 5 ct/kWh liegt. Dies würde sich negativ auf die Amortisationszeit der Abwärmeverstromung auswirken.

In beiden Szenarien, erweisen sich die TEG aufgrund ihres momentanen Demonstrationsstatus in geforderten Temperaturbereich als die unwirtschaftlichste Variante. Dies kann sich zukünftig durch eine Massenproduktion und Verwendung neuer Materialien ändern, wenn die Zielvorgabe der Hersteller für die spezifischen Investitionskosten von rd. 2.000 - 3.000 €/kW_{el} erreicht wird. Dies wurde für die hier vorgenommenen Betrachtungen nicht berücksichtigt. Auffällig ist der große Unterschied in den Amortisationszeiten der Dampfturbine. Dies liegt im schlechten Teillast- und Anfahrverhalten der Dampfturbine begründet, die im diskontinuierlichen Betrieb nahezu nicht zu betreiben ist. Der ORC-Prozess erweist sich für den kontinuierlichen Betrieb nach den TEG als das unwirtschaftlichste Verfahren, da hier die spezifischen Investitionskosten am höchsten sind. Beim diskontinuierlichen Betrieb sind die Amortisationszeiten von ORC und Dampfmotor am geringsten und aufgrund des besseren Teillastverhaltens deutlich geringer als bei der Dampfturbine. Eine Sensitivitätsanalyse über den Strompreis zeigt für Szenario 1, dass sich alle Verfahren bis auf die TEG in einem Zeitraum von maximal rd. 9 Jahren amortisieren können, siehe **Bild 43**. Für Szenario 2 ergibt die Sensitivitätsanalyse, dass die ORC-Anlage für den stark diskontinuierlichen Betrieb die beste Wirtschaftlichkeit erreicht. Aber auch hier liegt die zu erwartende Amortisationszeit mit minimal rd. 7,5 Jahren noch ziemlich hoch, siehe **Bild 44**.

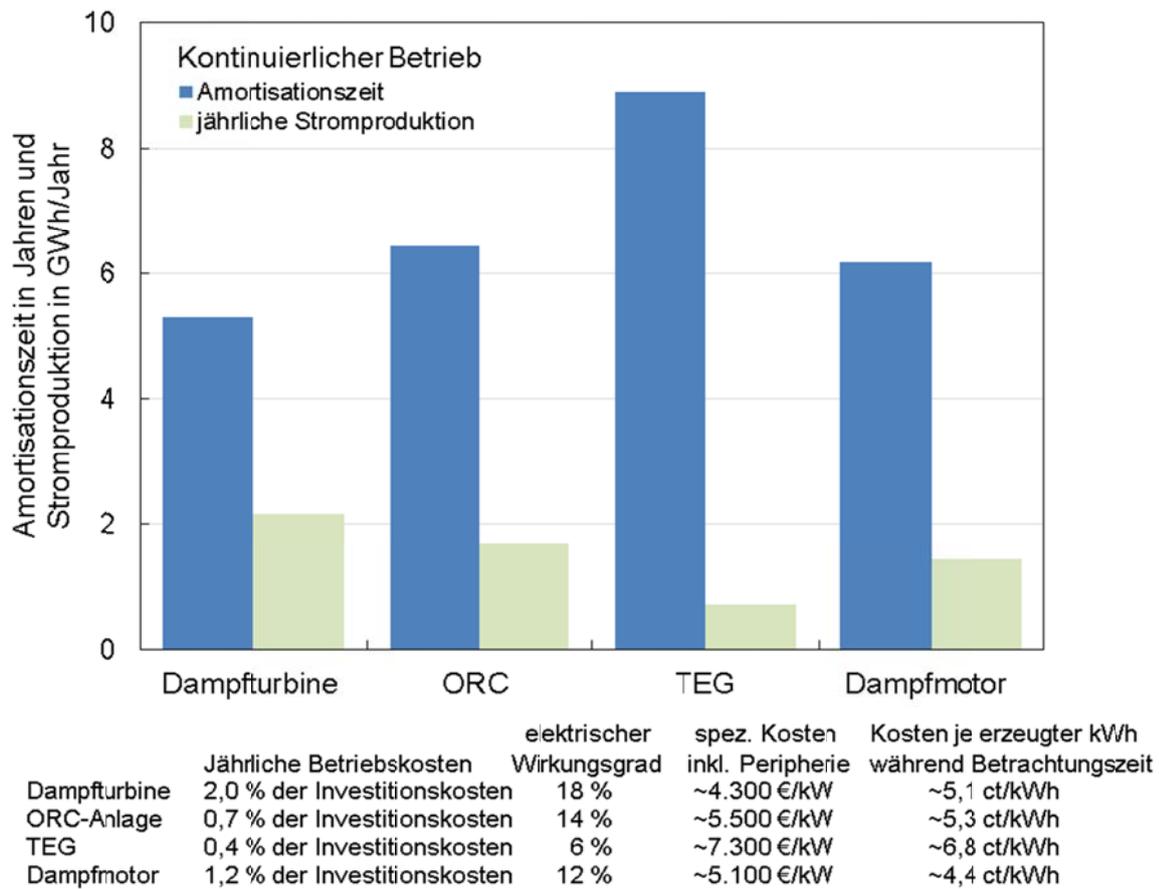


Bild 41: Wirtschaftlichkeitsabschätzung Szenario 1

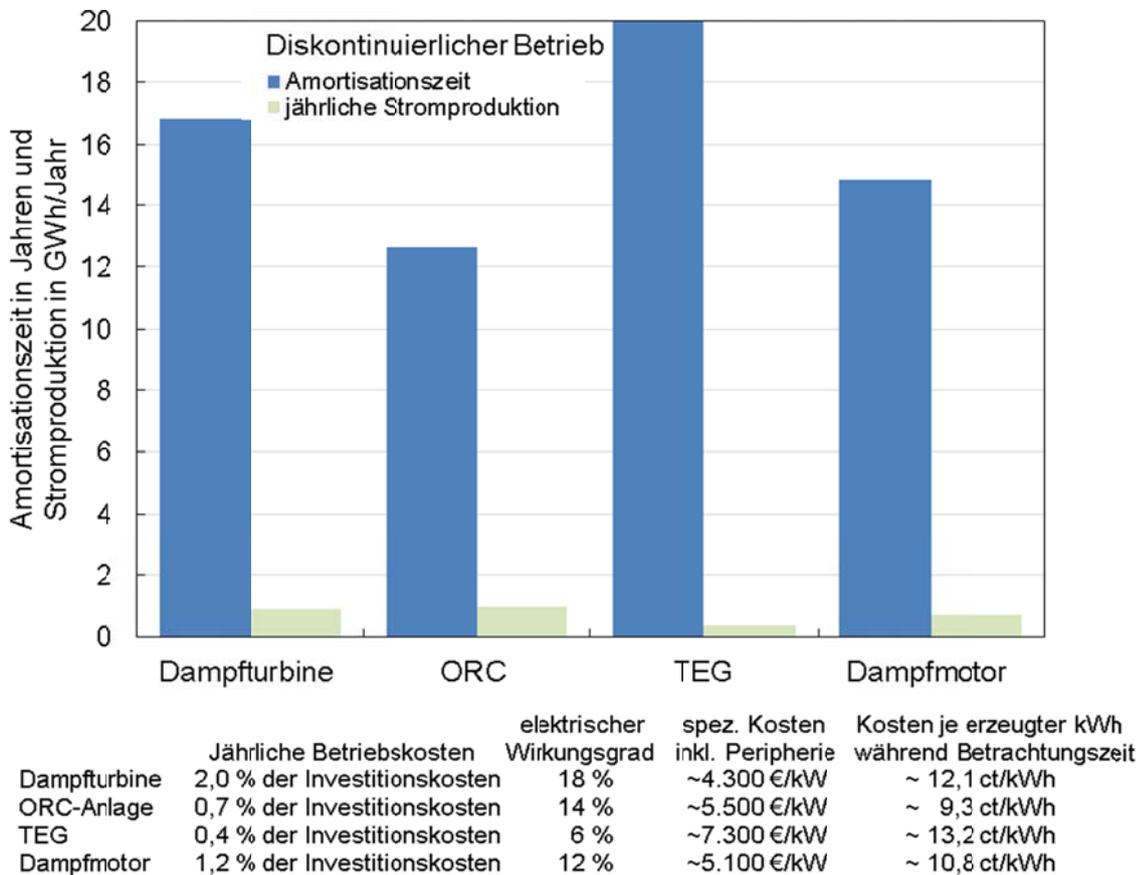


Bild 42: Wirtschaftlichkeitsabschätzung Szenario 2

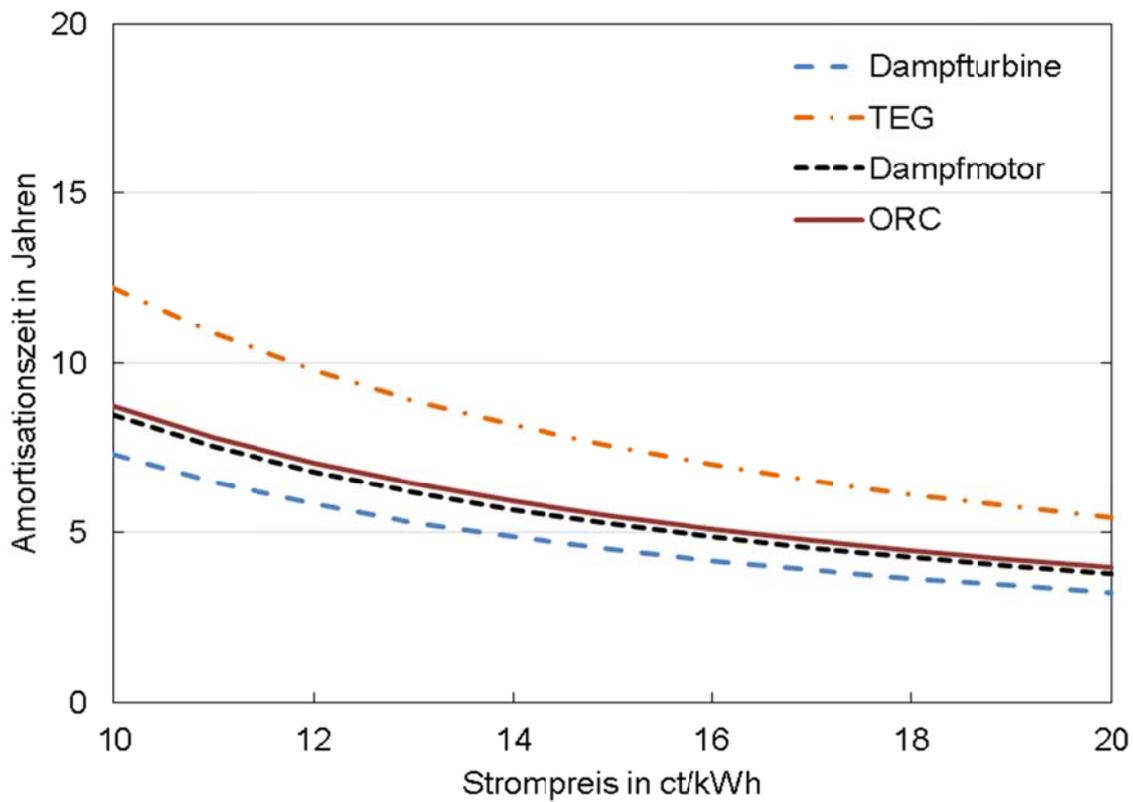


Bild 43: Abschätzung der Amortisationszeiten verschiedener Verstromungsverfahren für Szenario 1

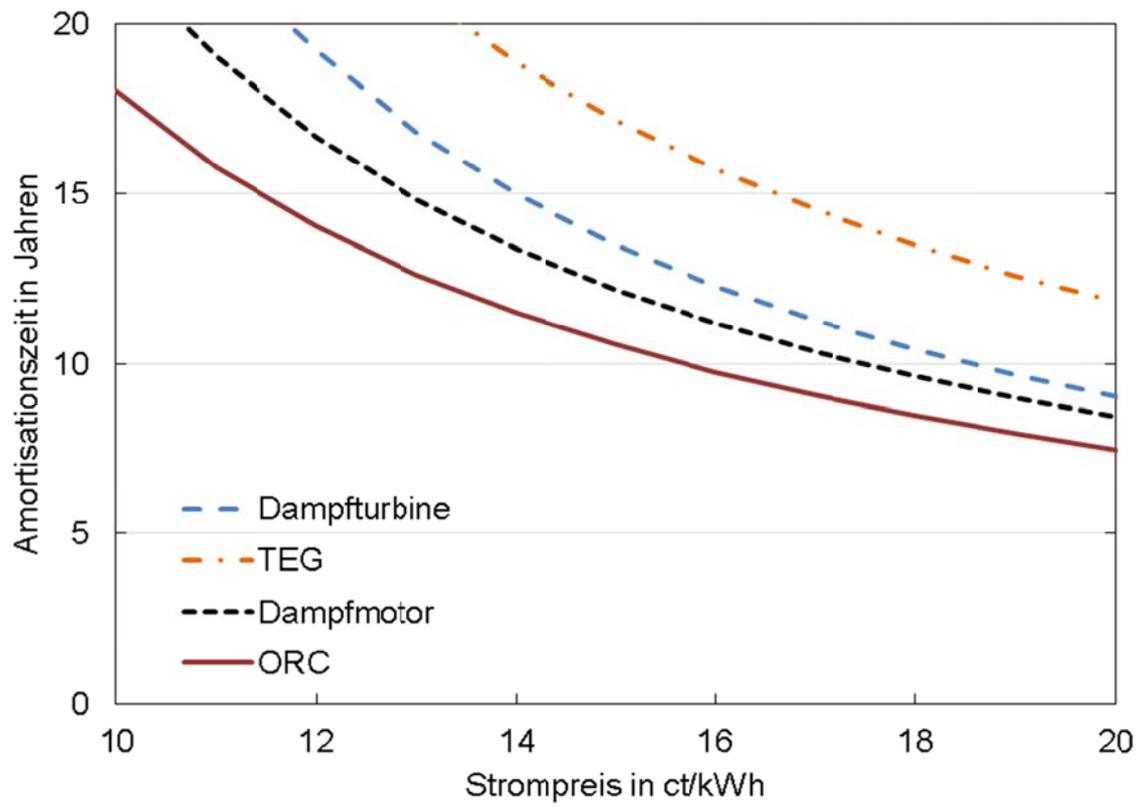


Bild 44: Abschätzung der Amortisationszeiten verschiedener Verstromungsverfahren für Szenario 2

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich alle Verfahren bis auf die TEG innerhalb der Nutzungsdauer amortisieren können, insbesondere bei kontinuierlichem Betrieb. Die Wirtschaftlichkeit der Verfahren hängt natürlich auch von der Erwartungshaltung des jeweiligen Anwenders und den dort vorliegenden Randbedingungen ab. Keines der genannten Verfahren lässt eine kurze Amortisationszeit erwarten. Mit steigenden Stromkosten sind geringere Amortisationszeiten möglich, sofern der für den Eigenbedarf genutzt werden kann. Eine Einspeisung in das öffentliche Netz wird sich bei den derzeitigen niedrigen Strompreisen an der Strombörse vom wirtschaftlichen Gesichtspunkt nicht lohnen.

Um zukünftig den Betrieb der ORC-Anlage zu verbessern und somit die Wirtschaftlichkeit der Anlage zu erhöhen ergeben sich verschiedene Optionen:

- Insgesamt wird es die Aufgabe sein, der ORC-Anlage mehr Abwärme zur Verfügung zu stellen. Dies würde sich automatisch mit dem Betrieb aller 4 angeschlossenen Öfen einstellen, was bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht der Fall war. Der Betrieb der Öfen hängt im Wesentlichen von der Auftragslage ab und ist nur begrenzt zu beeinflussen.
- Um den Eigenstromverbrauch der ORC-Anlage zu senken, ist der Austausch einer der Speisepumpen im Kältemittelkreislauf durch eine Pumpe mit geringerer Leistung für den Betrieb im Kleinlastbetrieb möglich.
- Z. Z. wird der Bau eines BHKW durch die Fa. Grimm geprüft, dessen Abwärme zusätzlich der ORC-Anlage zugeführt werden könnte, so dass sich bei Volllastbetrieb der Schmiedeöfen alle 4 Turbinen der ORC-Anlage betreiben lassen. Zudem würde sich der Betrieb der ORC-Anlage deutlich vergleichmäßigen und zumindest mit einer Turbine kontinuierlich sein. Dies würde die Wirtschaftlichkeit je nach Größe des BHKW und der damit zur Verfügung stehenden Abwärme signifikant verbessern.

6.4.2 Nutzenanwendungskonzepte zur Übertragung auf andere Thermoprozessanlagen

Insgesamt lässt sich die in diesem Vorhaben umgesetzte Technik theoretisch auf alle Industriebereiche mit Abwärmeströmen mit einem Temperaturniveau von über 150°C übertragen. Dies trifft auf eine Vielzahl von Thermoprozessanlagen verschiedener Industriebereiche zu z. B. Zementdrehrohröfen, Elektrolysezellen bei der Aluminiumproduktion, Schmelzöfen der Glas- und Keramikindustrie, Wärmöfen der Eisen- und Stahlindustrie usw.. Es muss jedoch immer im Einzelfall geprüft werden, ob die Installation einer Abwärmeverstromung mittels ORC-Anlage technisch sinnvoll und wirtschaftlich ist, da sich die vorliegenden Randbedingungen selbst für gleichartige Thermoprozessanlagen von Betrieb zu Betrieb erheblich unterscheiden können und nicht zwingend mitei-

nander vergleichbar sind. Eine allgemeine Vorgehensweise für die Verifizierung der technischen und wirtschaftlichen Umsetzbarkeit einer Abwärmeverstromung, unabhängig vom Industrie- und Anwendungsbereich, wäre folgende:

1. Aufnahme des Ist-Zustand des Abwärmestroms (Temperaturniveau, Abwärmeleistung mit Maxima, Minima, Mittel/Medianwert, zeitlichem Verlauf (Tag, Woche, Monat, Jahr), Schadstoffbelastung des Abwärmemediums, Aggregatzustand des Abwärmemediums)
2. Informationsbeschaffung bzgl. möglicher Verstromungsverfahren und Vorauswahl geeigneter Verfahren entsprechend allgemeiner Einsatzmöglichkeiten der Verfahren z. B. entsprechend [1] und [2]
3. Abschätzung der möglichen Stromproduktion im zeitlichen Verlauf und Ermittlung von Möglichkeiten den Strom im Betrieb möglichst vollständig zu nutzen z. B. durch einen Abgleich von Stromproduktion und Strombedarf von Verbrauchern über verschiedenen Zeiträume (Tag, Woche, Monat, Jahr)
4. Örtliche Begebenheiten am Aufstellungsort und der näheren Umgebung (Platz, Aufwand für zusätzlichen Leitungsbau, Fundamente, Gebläse, Pumpen, elektrische und Medienanschlüsse, ...)
5. Verifizierung der technischen Umsetzbarkeit
6. Ermittlung der rechtlichen und organisatorischen Randbedingungen (Genehmigungen von Behörden oder zertifizierten Stellen z. B. TÜV für Lärmschutz, Gewässerschutz usw., Anbindung an das Stromnetz, Einbeziehung des örtlichen Energieversorgers, Vergütung einer Stromeinspeisung, Förder- und Finanzierungsmöglichkeiten (Investitionszuschüsse, zinsgünstige Darlehen), erforderliche Qualifikation des Bedienpersonals)
7. Angebote einholen
8. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Gesamtsystems inkl. Peripherie und erforderlicher Umbauten, Gutachten usw.
9. Angebote auswählen und Umsetzung des Projekts

7. Verwertungsplan

Die Abwärmeverstromung mittels ORC ist auf ein breites Feld verschiedener Industrien anwendbar. Insbesondere im Hinblick auf die politischen Vorgaben zur Energiewende, CO₂-neutralen Stromerzeugung und zur Steigerung der Energieeffizienz in der Industrie sind die Vermarktungsmöglichkeiten als gut einzuschätzen. Innerhalb der Eisen- und Stahlindustrie verfügen verschiedene Anlagentypen wie z. B. Bänderwärmungsanlagen

(in Deutschland rd. 40 Anlagen in Betrieb) und Schmiedeöfen (in Deutschland rd. 500 Anlagen in Betrieb) über ein großes noch ungenutztes Abwärmepotential. Auch in anderen Industriebereichen sind Anwendungen an verschiedenen Thermoprozessanlagen, z. B. Drehrohröfen der Zementindustrie oder Schmelzöfen der Glasindustrie ab einer Abwärmetemperatur von über 150°C möglich. Die technische Umsetzbarkeit und Wirtschaftlichkeit müssen jedoch für den jeweiligen Einsatzfall im Vorfeld ermittelt werden.

Die installierte ORC-Anlage verbleibt auch nach Projektende bei der Fa. Grimm und senkt durch die Eigenstromnutzung die Kosten für den externen Strombezug und trägt auch zukünftig zur Reduzierung der CO₂-Emissionen bei. Die Anlage kann von interessierten Kreisen und potentiellen Anwendern bei der Fa. Grimm besichtigt werden.

Das gewonnene Wissen und Know-how aus dem Projekt, der Inbetriebnahme und dem Langzeitbetrieb der ORC-Anlage wird über die Projektpartner und den Anlagenhersteller Bosch KWK Systeme GmbH über Dienstleistungen und Beratungen interessierten Kreisen und potentiellen Anwendern zur Verfügung gestellt. Zudem ist der Kenntnistransfer durch die ständige enge Zusammenarbeit der Verbundpartner mit verschiedenen Anlagenbetreibern aus dem Bereich der Eisen- und Stahlindustrie gesichert. Darüber hinaus werden die Ergebnisse in den Fachausschüssen des Stahlinstitutes VDEh und in Fachzeitschriften (auch außerhalb der Eisen- und Stahlindustrie) publiziert.

8. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens durch andere Stellen

Im Zuge der wachsenden Dringlichkeit des Klimaschutzes ist die Nutzung von Abwärme aus industriellen Prozessen in den letzten Jahren immer mehr in den Fokus gerückt. Die IZES gGmbH hat hierzu im Jahr 2010 eine Studie [30] zu den Abwärmepotentialen der deutschen Industrie durchgeführt. Ergebnis zweier Betrachtungsszenarien ist, dass das theoretische Abwärmepotential der Industrie rd. 280 – 300 TWh/a beträgt. Die mögliche Verstromung der Abwärme durch Dampfturbine oder ORC wird auf 36 – 44 TWh/a geschätzt, ohne jedoch die technisch-wirtschaftliche Machbarkeit zu verifizieren. In einer anderen Untersuchung [3] werden die Verluste durch ungenutzte Abwärmeströme mit $T > 140^{\circ}\text{C}$ in der deutschen metallherzeugenden Industrie auf 169 PJ/a geschätzt. Für die Zementindustrie wurden 89 PJ und für die Chemieindustrie 37 PJ ermittelt. Das weitere Abwärmepotential der deutschen Industrie mit $T < 140^{\circ}\text{C}$ wird zusätzlich mit 160 PJ abgeschätzt. Zudem werden Hemmnisse (strukturell, finanziell, administrativ, informell, technologisch, ...) bei der Umsetzung einer Abwärmennutzung in den Betrieben und Möglichkeiten zur Beseitigung der Hemmnisse aufgezeigt z. B. durch Förderprogramme und Änderung rechtlicher Rahmenbedingungen.

Die sächsische Energieagentur hat im Jahr 2012 zur Förderung der landesweiten Abwärmennutzung einen Abwärmeatlas erstellt durch den Betriebe mit Abwärmeaufkommen mit Betrieben mit Wärmebedarf zusammengebracht und so Synergieeffekt geschaffen werden sollen [2]. Zudem werden in einer umfangreichen Informationsbroschüre verschiedene Verfahren zur Abwärmennutzung vorgestellt. Mittels einer Checkliste zur Erstbewertung von Abwärmennutzungstechnologien wird Betrieben die Möglichkeit gegeben, aus der Vielzahl an Technologien auf schnelle Weise die vielversprechendsten für das jeweilige Abwärmeaufkommen zu identifizieren. Eine ähnliche Darstellung mit einer sehr umfangreichen Betrachtung verschiedener Abwärmennutzungstechnologien und Abschätzungen zur Wirtschaftlichkeit der Verfahren findet sich auch in [1].

In [31] findet sich ein Vergleich der Abwärmeverstromung mit Dampfturbine, Dampfmotor und ORC-Anlage für die Stahlindustrie. Es werden verschiedene Szenarien z. B. für Abwärme aus dem Elektrolichtbogenofen und aus dem Hubbalkenofen betrachtet. Ergebnis ist, dass das am besten geeignete Verfahren im Einzelfall nach den jeweiligen Prozessbedingungen ausgewählt werden muss. Bei stark diskontinuierlichem Betrieb ist der ORC-Prozess im Vorteil jedoch in seiner Leistung auf 20 MW begrenzt. Bei kontinuierlichem Betrieb, hoher Abwärmtemperatur und -leistung erweist sich zumeist die Dampfturbine als das bessere Verfahren. Der Dampfmotor hat im Vergleich mit den anderen beiden Verfahren meist einen zu geringen Wirkungsgrad.

Eine Untersuchung der Abwärmepotentiale für ein integriertes Hüttenwerk (Stahlproduktion 4,2 Mio t/a, Koksproduktion 1 Mio t/a) identifiziert den Sinterkühler (1,06 PJ), die Kokerei (0,74 PJ), das Warmwalzwerk (0,5 PJ), den Strangguss (0,48 PJ) und die Schlacke (0,47 PJ) mit den höchsten nutzbaren Abwärmepotentialen [32]. Da für die Nutzung hoher Abwärmtemperaturen schon viele Technologien existieren, wird zur Nutzung von Niedertemperaturabwärme, die häufig nicht genutzt wird, der Einsatz von Wärmepumpen betrachtet. Ergebnis ist, dass durch Wärmepumpen die Abwärme auf ein besser nutzbares Temperaturniveau gebracht werden kann, der ökonomische Nutzen jedoch für jeden Einzelfall geprüft werden muss.

Im Bereich der ORC-Technologie, die für die Nutzung von Abwärme vor allem im Temperaturbereich bis rd. 500°C immer mehr an Bedeutung gewinnt, sind die Hauptforschungsgebiete: Arbeitsmedien (mit erreichbaren Wirkungsgradsteigerungen bis zu 15 %), die Prozessführung zur optimalen Anpassung von ORC-Anlagen an die Temperaturprofile der Wärmequelle und -senke, die Anlagenkomponenten sowie die Erhöhung der Prozessparameter [33], [34], [23]. So werden z. B. in [35] verschiedene Arbeitsmedien für den Temperaturbereich von 250 – 500°C miteinander verglichen. Ergebnis ist, dass sich je nach Temperaturbereich ein anderes Arbeitsmedium als vorteilhaft erweist

(bis 300°C n-Hexan, über 300°C Toluol). Im Vergleich des ORC mit dem Dampfprozess erweist sich der ORC-Prozess aufgrund der Eigenschaften der Arbeitsmedien bis zu einer Temperatur von 400°C als thermodynamisch vorteilhaft.

Eine Marktstudie zu ORC-Anlagen [36] zeigt auf, dass in Deutschland rd. 150 ORC-Anlagen zur Abwärmenutzung installiert sind. Das weitere, mittels der ORC-Technik nutzbare, Abwärmepotential wird auf 30 TWh/a abgeschätzt, was auf ein Installationspotential von rd. 2.500 ORC-Anlagen mit einer elektrischen Leistung von 200 kW schließen lässt. Dies zeigt auf, wie groß das Potential für die Abwärmenutzung mittels ORC-Prozess allein in Deutschland noch ist. Als weiteres großes Feld zur Nutzung der ORC-Technik wird die Abwärme von Biogasanlagen aufgeführt

Die Ghent University (Belgien) hat die ORC-Technologie in einer Untersuchung technisch-wirtschaftlich bewertet [23]. Für ein Hüttenwerk wird die mögliche CO₂-Einsparung mittels Abwärmeverstromung durch ORC-Anlagen auf 3 % abgeschätzt. Großes Potential wird auch in der Zementindustrie identifiziert, da hier rd. 40 % der Abwärme gasförmig und in einem Temperaturbereich von 215 – 315°C anfallen. Z. Z. verteilt sich die Gesamtleistung installierter ORC-Anlagen zu 57 % auf Biomasse, 22 % auf Geothermie, 20 % auf Abwärmenutzung und 1 % auf solare Anwendungen.

Im Zuge des „HREII Demo Project“ [37] wird die mögliche Abwärmeverstromung mit ORC-Anlagen in Europa auf 630 MW_{el} abgeschätzt. Davon fallen 377 MW_{el} auf die Eisen- und Stahlindustrie, 146 MW_{el} Zementindustrie und 107 MW_{el} Glasindustrie. Im Bereich der Abwärmeverstromung mittels ORC-Anlagen in der Stahlindustrie werden zwei Projekte der Fa. Turboden beschrieben:

1. Feralpi Stahlhandel, Abwärmenutzung am Elektrolichtbogenofen mit 3 MW_{el} und
2. Tata, Abwärmenutzung im Warmwalzwerk mit 0,7 MW_{el}.

Weitere Projekte zur industriellen Abwärmeverstromung mittels ORC-Anlagen finden sich hauptsächlich im Bereich der Zement- und Glasindustrie.

Das BMWi hat ein Forschungsvorhaben zur Entwicklung von ORC-Anlagen auf Motorenbasis gefördert [38], die auch zur Nutzung von Abwärme im Temperaturbereich von 200 – 500°C geeignet sind. Vorteil einer ORC-Anlage auf Motorenbasis ist die Drehzahlunabhängigkeit und damit ein noch besserer Betrieb im Teillastbereich. Seit 2009 befindet sich eine Demonstrationsanlage zur Nutzung der Abwärme eines Grubengasmotors in Betrieb. Langzeittests an der Demonstrationsanlage zeigen, dass sich eine Anlage zur Nutzung der Abwärme von 3 MW eines Ofens innerhalb von 5 Jahren amortisieren kann. Wird die Restwärme der ORC-Anlage zusätzlich zu Heizzwecken verwendet, ist eine Amortisationszeit von 3 Jahren möglich. Zur Nutzung der Technologie kommen laut

dem Forschungsvorhaben rd. 500 Industriebetriebe und 1.000 Blockheizkraftwerke mit Leistungen größer 1,2 MW in Deutschland in Frage.

In 2011 wurde bei Tosçelik in der Türkei ein Verbund von 4 ORC-Anlagen zur Nutzung der Abwärme des Hubbalkenofens in Betrieb genommen [39]. Die maximale Leistung beträgt 1 MW_{el}. Erste Betriebsergebnisse zwischen September 2011 und Februar 2012 lieferten eine durchschnittliche Stromproduktion von 9,2 MWh pro Tag.

Die Universität Udine (Italien) hat die Verstromung der Abwärme von Elektrolichtbogenöfen mittels zwischengeschalteten Wärmespeichers und ORC-Anlage in einer Studie untersucht [40]. Das Abwärmepotential wird je nach Leistung des Elektrolichtbogenofens auf 15-40 MW_{th} abgeschätzt, wovon mehr als 50 % nutzbar sind. Durch die zwischenzeitliche Wärmespeicherung kann eine nahezu kontinuierliche Nutzung der Abwärme bei gleichmäßigerer geringerer Temperatur von 250 - 500°C erreicht werden, so dass die ORC-Anlage besser für einen Temperaturbereich ausgelegt und betrieben kann werden.

Insgesamt zeigt sich, dass die Nutzung von Abwärme für die Industrie einen immer größeren Stellenwert hat. Die Vielzahl an verschiedenen industriellen Abwärmequellen stellen die Abwärmenutzung aufgrund häufig wechselnder Randbedingungen immer noch vor große Herausforderungen, die häufig angepasste Einzellösungen erfordern. Dadurch besteht auf diesem Gebiet weiterhin ein hoher Forschungsbedarf, auch wenn in den letzten Jahren einige Demonstrationsprojekte, auch in der Stahlindustrie, erfolgreich durchgeführt werden konnten.

9. Veröffentlichungen zum Forschungsvorhaben

Erste Ergebnisse des Vorhabens wurden an verschiedenen Stellen veröffentlicht:

1. Vortrag beim ZIM-Netzwerkprojekt „Abwärme Metallurgie“ am 13.09.2012 bei der Mitteldeutschen Industrieofen GmbH & Co KG in Striegistal zur Auslegung, Installation und Inbetriebnahme der ORC-Anlage.
2. Kurzbeschreibung des Forschungsprojekts und des Stands der Arbeiten innerhalb der Vorstellung des Bereichs „Energie- und Ressourcentechnik“ im BFI-Tätigkeitsbericht 2011/2012.
3. Darstellung des Forschungsprojekts innerhalb der Vorstellung der Abteilung für „Gastechnik und Energiewirtschaft“ des BFI in der Fachzeitschrift „Gaswärme International“ Ausgabe 6/2012.

4. Vorstellung der durchgeführten Betriebsmessungen, des Ofenbilanzierungssystems und erster Betriebserfahrungen mit der ORC-Anlage beim ZIM-Netzwerkprojekt „Abwärme Metallurgie“ am 21.03.2013 bei der ZTS GmbH in Glaubitz.
5. Vorstellung des Projektes am 25.04.2013 im Fachausschuss Thermoprozesstechnik des VDEh bei der voestalpine Stahl GmbH in Linz (Österreich).
6. Vortrag zum Projekt am 07.11.2013 auf dem VDI-Spezialtag „Stromerzeugung aus Abwärme mittels ORC“ in Raunheim.
7. Vorstellung des Projekts auf einer Fachtagung zum Thema KWK in Solingen, Haus Müngsten der IHK am 25.11.2013.
8. „Strom entsteht aus Abwärme“, Artikel im Remscheider General-Anzeiger, 04.06.2014, S. 20.

Weitere, auch branchenübergreifende, Veröffentlichungen zu den Ergebnissen des Langzeitbetriebs sind geplant.

10. Schlussfolgerung und Ausblick

Im vorliegenden Forschungsvorhaben wurde die Abwärmeverstromung am Beispiel eines Schmiedebetriebs demonstriert. Mittels Betriebsmessungen und Auswertung vorliegender Daten wurden die im Betrieb vorliegenden Randbedingungen ermittelt sowie die zur Verfügung stehende Abwärmeleistung von vier Schmiedeöfen ($2.150 \text{ kW}_{\text{th}}$ bei rd. 550°C) spezifiziert. Als geeignetstes Verstromungsverfahren, bezogen auf die ermittelten Randbedingungen, wurde der ORC-Prozess identifiziert. Im Vorfeld der Installation der ORC-Anlage mussten u. a. eine neue Abgassammelleitung, neue Gebläse und Fundamentarbeiten durchgeführt werden. Im März 2012 konnte die ORC-Anlage mit einer z. Z. maximal möglichen elektrischen Leistung von 300 kW in Betrieb genommen werden. Nach der Inbetriebnahme trat eine Reihe verschiedener Betriebsstörungen auf, so dass die Anlage bis Ende 2013 nicht kontinuierlich betrieben werden konnte. Begleitend zu den Arbeiten an der ORC-Anlage wurde zur Unterstützung des ORC-Anlagenbetriebes ein Ofenbilanzierungsprogramm entwickelt und installiert. Das Programm beinhaltet Prognosefunktionen zum Erdgas- und Stromverbrauch, sowie der Abwärmeleistung und dem daraus zu erzeugenden Strom und unterstützt damit eine vorausschauende Planung der Ofenfahrweise und des ORC Betriebs.

Nachdem die Betriebsstörungen der ORC-Anlage Ende 2013 / Anfang 2014 weitestgehend beseitigt werden konnten, stellte sich ein weitestgehend kontinuierlicher Betrieb ein. Dadurch hat sich auch der Eigenverbrauch der Anlage infolge der seltener vorkommenden An- und Abfahrvorgänge verringert und somit die Nettostromausbeute erhöht. Im Jahr 2014 konnte die Anlage bis einschließlich Juli rd. 2.600 Stunden betrieben wer-

den, was einer zeitlichen Auslastung von rd. 50 % entspricht. In diesem Zeitraum wurde eine Nettostromproduktion von rd. 156.000 kWh erreicht. Bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt konnte der ORC-Anlage jedoch noch nicht die maximal mögliche Abwärmeleistung zur Verfügung gestellt werden, da zu keinem Zeitpunkt alle 4 angeschlossenen Öfen in Betrieb waren u. a. infolge von Ofenumbauten und – revisionen. Dadurch waren bislang maximal 2 der 4 Turbinen der ORC-Anlage gleichzeitig in Betrieb, so dass maximal die halbe Leistung der Nennleistung erreicht wurde.

Im Projektverlauf haben sich die Unternehmensziele der Fa. Grimm von der Serienfertigung zur Stückauftragsfertigung verschoben. Dies führte dazu, dass nicht vier baugleiche große Schmiedeöfen an die ORC-Anlage angeschlossen werden konnten, sondern einer der Öfen durch einen 30-Zentner-Ofen mit deutlich geringerer Leistung ersetzt wurde. Dadurch kann der ORC-Anlage nicht die Abwärmeleistung zur Verfügung gestellt werden auf die sie ausgelegt wurde. Daraus ergibt sich, dass z. Z. maximal ein Betrieb der ORC-Anlage mit drei der vier Turbinen möglich ist. Der Anschluss weiterer Öfen zur Erhöhung des Abwärmepotentials bietet sich aufgrund der hohen Kosten für den erforderlichen Leitungsbau und die geringe Leistung der noch verfügbaren Öfen z. Z. nicht an.

Die gesamte Nettostromproduktion bis einschließlich Juli 2014 beträgt rd. 200.000 kWh mit einer CO₂-Einsparung von rd. 120.000 kg. Die zu erwartende Amortisationszeit der ORC-Anlage liegt je nach Strompreis zwischen 7,5 und 19,5 Jahren. Über die gesamte Lebenszeit der ORC-Anlage von anzunehmenden 20 Jahren kann eine CO₂-Ersparnis von rd. 11.400 t erreicht werden. Die Wirtschaftlichkeitsabschätzung hat ergeben, dass bei diskontinuierlichem Betrieb die Amortisationszeit für den ORC-Prozess im Vergleich zu Dampfturbine, Dampfmotor und TEG am kürzesten ist. Insgesamt ist jedoch nur in seltenen Fällen bei einer Abwärmeverstromung mit einer heutzutage oft üblichen geforderten Amortisationszeit von unter 4 Jahren zu rechnen. Über die gesamte Lebensdauer einer Verstromungsanlage ist die Wirtschaftlichkeit jedoch zumeist gegeben.

Zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der ORC-Anlage wird es zukünftig die Aufgabe sein, der ORC-Anlage mehr Abwärme zur Verfügung zu stellen. Dies würde sich automatisch mit dem Betrieb aller 4 angeschlossenen Öfen einstellen, was jedoch im Wesentlichen von der Auftragslage abhängt und nur begrenzt zu beeinflussen ist. Der Stromeigenverbrauch der ORC-Anlage kann durch den Austausch einer der Speisepumpen im Kältemittelkreislauf durch eine Pumpe mit geringerer Leistung gesenkt werden. Zudem wird z. Z. der Bau eines BHKW durch die Fa. Grimm geprüft. Die Abwärme des BHKW könnte zusätzlich der ORC-Anlage zugeführt werden, so dass sich bei Volllastbetrieb der Schmiedeöfen alle 4 Turbinen der ORC-Anlage betreiben lassen. Weiter-

hin würde sich mindestens ein kontinuierlicher Betrieb der ORC-Anlage mit einer Turbine einstellen. Dies würde die Wirtschaftlichkeit je nach Größe des BHKW und der damit zur Verfügung stehenden Abwärme signifikant verbessern.

Eine direkte Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse des vorliegenden Forschungsvorhabens auf die mögliche Umsetzung einer Abwärmeverstromung an anderen Thermoprozessanlagen kann nicht vorgenommen werden. Vielmehr muss für jeden Anwendungsfall geprüft werden, ob die Installation einer Abwärmeverstromung mittels ORC-Prozess technisch sinnvoll und wirtschaftlich ist, da sich die Randbedingungen selbst für gleichartige Thermoprozessanlagen von Betrieb zu Betrieb erheblich unterscheiden können und nicht zwingend miteinander vergleichbar sind. Um mögliche Anwender bei diesem Prozess zu unterstützen, wurden allgemeine Handlungsempfehlungen bei der Bearbeitung und Abschätzung eines solchen Projekts erarbeitet, die unabhängig vom Typ der Thermoprozessanlage und Industriebranche angewendet werden können.

Schrifttum

- [1] Wersch, M.: Sachbericht – Technologierecherche Abwärmenutzung, Sächsische Energieagentur – SAENA GmbH, 2010
- [2] Sächsische Energieagentur – SAENA GmbH: Technologien der Abwärmenutzung, Druckerei Wagner Verlag und Werbung GmbH, 2012
- [3] Pehnt, M.; Bödeker, J.; Arens, M.; Jochem, E.; Idrissova, F.: Die Nutzung industrieller Abwärme – technisch-wirtschaftliche Potenziale und energiepolitische Umsetzung, FKZ 03KSW016A und B, Heidelberg, Karlsruhe, Juli 2010
- [4] Koch, M.; Menzel, H.: Regenerative Stromerzeugung im Geothermischen Heizwerk Neustadt-Glewe durch Installation einer Turbinenanlage nach dem ORC-Prozess, Forschungsvorhaben 0327509 A, Schlussbericht 2003
- [5] BMU: Innovation durch Forschung, Jahresbericht 2007 Forschungsförderung im Bereich der erneuerbaren Energien
- [6] Obernberger, I.; Hammerschmid, A.; Bini, R.: Biomasse-Kraft-Wärme Kopplungen auf Basis des ORC-Prozesses – EU-THERMIE-Projekt Admont (A)
- [7] Baatz, E.: Verstromung von Niedertemperaturabwärme mit Hilfe einer ORC-Anlage im Zementwerk Lengfurt, Abschlussbericht Z 2.3 70441 – 2/3, 1999
- [8] Stahl, K.: Abwärmenutzung industrieller Prozess durch Organic Rankine Cycle, GASWÄRME International, 56, Nr. 1, 2007, S. 43 - 45
- [9] Ino, T.: Waste heat recovery power generation (WHRPG) for cement plants, 6th International VDZ Congress 2009, 30 September to 2 October 2009, Düsseldorf
- [10] Nobis, R.: Burning Technology, 6th International VDZ Congress 2009, 30 September to 2 October 2009, Düsseldorf
- [11] Born, C.; Granderath, R.: Konzepte für die Stromerzeugung aus Abwärme bei Elektrolichtbogen- und Wiedererwärmöfen, Stahl und Eisen, 132, Nr. 12, 2012, S. 115 – 120
- [12] Studie - Dezentrale Erzeugung in Österreich, E-Control GmbH, 2005
- [13] Wallner, C.; Reetz, B.; Kleinberger, J.: Analyse und Systematisierung existierender und vorgesehener Anlagen zur Stromerzeugung und Kraft-Wärme-Kopplung auf der Basis von Biomasse, VEÖ Journal, Nr. 3, 2002, S. 30 - 35
- [14] Wiese, A.: Nutzung von solarthermisch erzeugtem Dampf in Dampfmaschinen, 11. Internationales Sonnenforum, Köln 1998, Tagungsband S. 124 - 129
- [15] Schroeter, S.: Feste Biomasse liefert Strom und Nutzwärme. Eine Konkurrenz für Dampfmaschine und Dampfturbine, VDI-Nachrichten, 55, Nr. 47, 2001, S. 24
- [16] Interne Referenzliste der Spilling Energie Systeme GmbH, April 2008
- [17] Barin, I.; Knacke, O.; Kubaschewski, O.: Thermochemical properties of inorganic substances, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, Verlag Stahleisen m. b. H., Düsseldorf, 1977
- [18] Hrsg.: LOI Thermoprozess: Taschenbuch für Thermoprozess-Technik, Vulkan-Verlag, Essen, 1999
- [19] Cerbe, G.; Wilhelms, G.: Technische Thermodynamik, 15. aktualisierte Auflage, Hanser, 2008
- [20] ISO/FDIS 13589-1:2012 Industrial furnaces and associated processing equipment - Method of measuring energy balance and calculating efficiency – Part 1: General methodology, 2012
- [21] VDI-Wärmeatlas

- [22] Umwelt Bundesamt für Mensch und Umwelt: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2012, Climate Change, 07/2013
- [23] Van den Broek, M.; Quoilin, S.; Declaye, S.; Lemort, V.: Organic Rankine Cycle Systems: A Techno-Economic Overview, Proceedings of EMC 2013, S. 833 – 844
- [24] Fröhlich, K., Eisenhut, C., Bitschi, A.: Anwendungspotential thermoelektrischer Stromerzeugung im Hochtemperaturbereich, Bundesamt für Energie Forschungsprogramm & -anwendungen, Abschlussbericht, 30. Januar 2009
- [25] Ivashechkin, P.: Ermittlung von Möglichkeiten zur Rückgewinnung und Nutzung von Niedertemperatur-Energie aus Abwässern der Metallindustrie, Bericht 4.61.168, VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH Düsseldorf, Juni 2010
- [26] Ivashechkin, P. et.al.: Reuse of low temperature (<350°C) for the reduction of CO₂ impact of the steel industry, research in progress, RFCS project, ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/coal-steel-rtd/docs/synopsis2008-2011-complete_en.pdf
- [27] Okinaka, N.; Akiyama, T.: Thermoelectric Properties of Non-stoichiometric Titanium Oxides for Waste Heat Recovery in Steelworks, ISIJ International, Vol. 50, Nr. 9, 2010, S. 1296 – 1299
- [28] Ebling, D.: Innovative Abwärmenutzung durch Thermoelektrik, Vortrag auf Tagung „Effiziente Brennertechnik für Industrieöfen“, Essen, 14.04.2010
- [29] Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK: Anwendungspotential der thermoelektrischen Stromerzeugung im Hochtemperaturbereich, Schlussbericht, 30. Januar 2010
- [30] Groß, B.; Tänzer, G.: IZES gGmbH erstellt Studie zu industriellen Abwärmepotentialen in Deutschland, Pressemitteilung, 29.10.2010
- [31] Born, C.; Granderath, R.: Waste Heat Power Generation From EAFs, SAFs and Reheating Furnaces – A Comparison, AISTech 2012 Proceedings, S. 811 – 819
- [32] Athanasios, P.; Mullan, H.: Identification and classification of waste heat streams and their exergy component review of enabling technologies on an integrated steelworks, METEC, INSTEELCOM, Düsseldorf, 27.06.2011
- [33] Wang, H.; Wang, H.; Zhang, Z.: Optimization of Low-Temperature Exhaust Gas Waste Heat Fueled Organic Rankine Cycle, Journal of Iron and Steel Research, International, Volume 19 (6), 2012, S. 30 – 36
- [34] Heberle, F.; Brüggemann, D.: Thermodynamische Grundlagen des ORC und aktuelle Forschungsaktivitäten, Jahrestagung des ORC-Fachverbandes e.V., 24.09.2012
- [35] Heberle, F.; Brüggemann, D.: Organic Rankine Cycle: An Alternative to Water Steam Cycles for Efficient Waste Heat Recovery, Proceedings of EMC 2013, S. 855 - 864
- [36] Ruemler, R.; Godolt, S.: Organic Rankine Cycle - Zusatzerträge durch verbesserte Nutzung der Abwärme, ew, Jg. 111, Heft 20 - 21, 2012
- [37] Za, G.: ORC technology for low and high temperature Jahrestagung des ORC-Fachverbandes e.V., 24.09.2012
- [38] BINE Informationsdienst: Abwärme zu Strom veredeln, Projektinfo 13/2011
- [39] Durmaz, A. et al.: Novel Application of Organic Rankine Cycle (ORC) Technology for Waste Heat Recovery From Reheat Furnace Evaporative Cooling System, AISTech 2012 Proceedings, S 1624 – 1633
- [40] Nardin, G.; Meneghetti, A.; Fabiani, M. E.: Technological Apparatus for the Moderation of Meltshop Off-Gas, AISTech 2012 Proceedings, S. 55 – 62

Bericht Nr. 32.014 / 80056

Alle Rechte , auch das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des BFI ist es auch nicht gestattet, diesen Bericht oder Teile daraus auf photomechanischem oder anderem Wege zu vervielfältigen.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Nutzung von Niedertemperaturabwärme zur Eigenstromerzeugung am Beispiel eines KMU-Schmiedebetriebs (NEBS)	
4. Autor(en) (Name(n), Vorname(n)) Mintus, F.; Stranzinger, B.; Schneider, W.; Grünke, J.	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.03.2014
	6. Veröffentlichungsdatum September 2014
	7. Form der Publikation Bericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Gustav Grimm Edelstahlwerk GmbH & Co. KG, Ronsdorfer Str. 172 – 174 D-42855 Remscheid VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH, Sohnstraße 65, D-40237 Düsseldorf	9. Ber.Nr. durchführende Institution 32.014
	10. Förderkennzeichen 01LY0904 A, 01LY0904 B
	11. Seitenzahl 69
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 40
	14. Tabellen 14
	15. Abbildungen 44
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung <p>In energieintensiven Industrien wird eine Vielzahl verschiedener Thermoprozessanlagen eingesetzt. An diesen Anlagen fallen prozessbedingt zumeist große Abgasabwärmeströme an, für deren Nutzung allgemein gilt: 1. Vermeidung der Abwärme, 2. Rückführung in den Prozess, 3. Betriebsinterne Verwendung der Abwärme, 4. Umwandlung in andere Energieformen und 5. Externe Verwendung der Abwärme. Die Punkte 1 bis 3 werden zumeist umgesetzt. Dennoch stehen an vielen Thermoprozessanlagen noch Abwärmeströme von über 300°C zur Verfügung. Eine Möglichkeit diese Abwärme zu nutzen, ist die Verstromung. Ziel dieses Verbundvorhabens war, am Beispiel eines KMU-Schmiedebetriebs die Nutzbarmachung eines Verfahrens zur Stromerzeugung aus der Niedertemperaturabwärme von Schmiedeöfen zu demonstrieren.</p> <p>Zunächst wurden anhand von Betriebsmessungen der nutzbare Abwärmestrom sowie die weiteren Randbedingungen ermittelt. Ergebnis war eine nutzbare Abwärmeleistung der vier Schmiedeöfen von rd. 2.000 kW_{th} bei einer Temperatur von rd. 550°C. Als am besten geeignetes Verstromungsverfahren wurde der ORC-Prozess identifiziert.</p> <p>Begleitend zu den Betriebsmessungen wurde ein anlagenübergreifendes Ofenbilanzierungssystem entwickelt, das Prognosefunktionen zum Erdgas- und Stromverbrauch, sowie der Abwärmeleistung und dem daraus erzeugten Strom beinhaltet.</p> <p>Für die Installation der ORC-Anlage mit einer Leistung von 300 kW_{el} waren verschiedene Umbaumaßnahmen vorzunehmen, z. B. die Anpassung der Abgasleitungsführung, Installation neuer Abgasgebläse sowie Fundamentarbeiten. Nach der Inbetriebnahme der Anlage traten Störungen auf, die einen kontinuierlichen Betrieb bis Ende 2013 verhinderten. Ab Anfang 2014 konnte ein kontinuierlicher Betrieb erreicht werden. Die gesamte Nettostromproduktion bis einschließlich Juli 2014 belief sich auf rd. 200.000 kWh mit einer daraus resultierenden CO₂-Einsparung von rd. 120 t.</p> <p>Im Projektverlauf haben sich die Unternehmensziele der Fa. Grimm verschoben, so dass anstatt der geplanten vier großen Schmiedeöfen nur drei der Öfen und ein Ofen mit geringerer Leistung an die ORC-Anlage angeschlossen werden konnten. Dadurch kann der Anlage nicht die Abwärmeleistung zur Verfügung gestellt werden auf die sie ausgelegt wurde, so dass z. Z. maximal rd. 200 kW_{el} erzeugt werden können.</p> <p>Die zu erwartende Amortisationszeit der ORC-Anlage liegt je nach Strompreis zwischen 7,5 und 19,5 Jahren. Über die gesamte Lebensdauer der ORC-Anlage von 20 Jahren kann eine CO₂-Ersparnis von rd. 11.400 t erreicht werden.</p> <p>Für weitere Anwendungen der Abwärmeverstromung mittels ORC muss individuell geprüft werden, ob eine Umsetzung sinnvoll ist, da sich die Randbedingungen selbst für gleichartige Thermoprozessanlagen von Betrieb zu Betrieb unterscheiden können. Daher wurden allgemeine Handlungsempfehlungen erarbeitet, die unabhängig vom Typ der Thermoprozessanlage angewendet werden können. Mögliche weitere Anwendungsgebiete sind Anlagen mit kontinuierlichem Abwärmestrom, z. B. Walzwerksöfen oder Werke mit einer Vielzahl diskontinuierlich betriebener Öfen, deren Abwärmeströme zusammengeführt werden können.</p>	
19. Schlagwörter Abwärmennutzung, Stromerzeugung, ORC, energetische Ofenbilanzierung	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e. g. report, publication) report
3. title Utilization of low temperature waste heat for power generation using the example of a SMEs forge (NEBS)	
4a. author(s) of the report (family name, first name(s)) Mintus, F.; Stranzinger, B.; Schneider, W.; Grünke, J.	5. end of project 31.03.2014
	6. publication date September 2014
	7. form of publication report
8. performing organization(s) (name, address) Gustav Grimm Edelstahlwerk GmbH & Co. KG, Ronsdorfer Str. 172 – 174 D-42855 Remscheid, Germany VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH, Sohnstraße 65, D-40237 Düsseldorf, Germany	9. originator's report no. 32.014
	10. reference no. 01LY0904 A, 01LY0904 B
	11. no. of pages 69
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 40
	14. no. of tables 14
	15. no. of figures 44
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract A variety of thermal processing facilities is used in energy-intensive industries. Due to the process usually a large amount of waste heat is generated in these facilities. For the usage of the waste heat generally following order is applied: 1. Prevention of waste heat, 2. Recycling into the process, 3. In-house use of the waste heat, 4. Transforming into other forms of energy and 5. External use of the waste heat. The points 1 to 3 are usually implemented. However, unused waste heat streams with temperatures of over 300°C are often present at thermal process facilities. One way to utilize this waste heat is to generate electricity. Aim of the joint research project was the demonstration of the power generation from the waste heat of forging furnaces. First step was the determination of the usable waste heat flow and the boundary conditions of the furnace operation based on performance measurements. Result was an identified usable waste heat flow of approximately 2,000 kW _{th} at a temperature of approximately 550°C. The ORC process was identified as the most appropriate power generation technique. Accompanying to the operational measurements a cross-plant furnace balancing program was developed. The program includes forecasting capabilities for natural gas and electricity consumption, waste heat flow and the electricity to be generated from the waste heat. For the installation of the ORC system with a capacity of 300 kW _{el} various replacements had to be done, e.g. adjustment of the exhaust piping, installation of new exhaust fans and foundation work. After the commissioning of the ORC plant significant disturbances occurred that prevented a continuous operation of the ORC system until the end of 2013. However, at the beginning of 2014 a continuous operation could be achieved. The total net electricity production up to July 2014 amounts to approximately 200,000 kWh with a resulting CO ₂ savings of approximately 120 t. During the project, the business goals of Grimm have shifted, so that instead of the planned four identical large forging furnaces only three of these furnaces and a furnace with significantly lower power could be connected to the ORC plant. Thus, the supplied waste heat to the ORC system is lower than the estimated waste heat when the plant was planned. Result is that at the moment approximately maximum 200 kW _{el} can be generated. The expected payback period of the ORC plant, depending on the price of electricity varies from 7.5 to 19.5 years. During the life expectancy of 20 years of the ORC plant, a CO ₂ saving of approximately 11,400 t can be reached. For further applications of power generation from waste heat by means of ORC it has to be checked individually, if an implementation makes sense, since the constraints may differ even for the same type of a thermal processing facility from company to company. Therefore general recommendations were developed that can be applied regardless of the type of the thermal processing facility. Other possible applications include facilities with continuous waste heat streams e. g. rolling mill furnaces or works with a variety of discontinuously operated furnaces whose waste heat streams can be merged.	
19. keywords waste heat recovery, power generation, ORC, energetic furnace balancing	
20. publisher	21. price