

## Abschlussbericht des Forschungsprojekts

### „Demonstration eines strukturierten, simulationsgestützten Vorgehens zur Konzeption der Abwärmenutzung in der Stahlindustrie am Beispiel der Georgsmarienhütte GmbH“

gefördert unter dem Az: 26276 von der

Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von



#### **Ansprechpartner + Projektleiter:**

Reimund Laermann

(☎ 05401 / 394380)

reimund.laermann@gmh.de

#### **Unterauftragnehmer:**

Limón GmbH, Große Rosenstraße 21, 34117 Kassel

Herr Dr. Mark Junge, (☎ 0561 / 220704-35), junge@limon-gmbh.de

Oktober 2011

Projektbeginn: 01.03.2010

Projektende: 30.10.2011

## Inhalt

1	Kurzfassung des Forschungsprojekts .....	4
2	Umweltrelevanz.....	5
2.1	Kurze Beschreibung der Umweltproblematik .....	5
2.2	Darstellung der umweltrelevanten Ziele (quantifiziert) /Energiebilanz- Modellrechnung .....	7
3	4-Punkte-Vorgehensweise zur Ermittlung von Abwärmepotenzialen .....	7
3.1	Allgemeines Vorgehen.....	7
3.2	1-Punkt – Identifikation von Abwärmequellen .....	8
3.3	2-Punkt – Erfassung relevanter Daten .....	9
3.4	3-Punkt – Bewertung relevanter Daten .....	14
3.5	4-Punkt – Darstellung der Ergebnisse .....	17
4	Vorgehensweise am Beispiel der Georgsmarienhütte GmbH.....	18
4.1	Identifikation von Abwärmequellen am Beispiel GMH.....	18
4.2	Erfassung relevanter Daten am Beispiel GMH.....	21
4.3	Bewertung relevanter Daten am Beispiel GMH.....	22
4.4	Darstellung der Ergebnisse am Beispiel GMH .....	24
5	Konzeptentwicklung.....	25
6	Simulation.....	27
6.1	Zielsetzung .....	33
6.2	Aufbau des Simulationsmodells.....	34
6.3	Wesentliche Ergebnisse .....	40

7	Erkenntnisse .....	46
8	Schlussfolgerung und Ausblick.....	48
9	Abbildungsverzeichnis .....	50

## 1 Kurzfassung des Forschungsprojekts

Der Klimawandel sowie die Rohstoffverknappung und steigende Preise für Öl, Gas und Strom erfordern eine deutliche Steigerung der Energieproduktivität. Die Stahlindustrie zählt zu den energieintensivsten Branchen in der Industrie. Eine Optimierung aus rein energetischer Sicht im Bereich der Abwärme wurde bisher überwiegend nur in Teilbereichen, jedoch nicht umfassend für einen Standort unter Berücksichtigung aller Abwärmequellen untersucht. Insgesamt ist aber ein hohes Potenzial im Wärmebereich zu verzeichnen, da während des Prozessverlaufs große Abwärmemengen auf verschiedenen hohen Temperaturniveaus vorhanden sind und einem vergleichsweise geringen Wärmebedarf der Unternehmen gegenüberstehen.

Ziel des durchgeführten Projektes ist es daher, geeignete Wärmequellen und -senken strukturiert zu identifizieren und zu bewerten.

Weiterhin sollen die vorhandenen Wärmeüberschüsse, die nicht als Wärme in den Prozess zurückgeführt werden können, mit einer geeigneten Wandlungstechnologie dezentral zur Stromerzeugung eingesetzt werden. Hierzu ist es bedeutsam diese intelligent zu verschalten, um den Exergieverlust zu reduzieren.

Aufgrund komplexer Zusammenhänge in der Produktion und verschiedener Wärmebedarfsprofile ist die Simulation eine zentrale Methode, welche die aktuelle Wärmesituation abbilden kann, Potenziale darstellt und bei der Maßnahmenentwicklung unterstützt.

Die hohe Komplexität und die damit verbundene Unsicherheit ist eine der größten Hemmnisse für eine Umsetzung der Maßnahmen. Im Rahmen des Projekts soll daher ein strukturiertes Vorgehen dargestellt und demonstriert werden, das sich von der konventionellen Betrachtungsweise durch dynamische Betrachtung zeitlicher Verläufe abhebt. Durch den Einsatz einer innovativen Analytik und geeigneter Simulationstools kann mit der komplexen Vernetzung der Stoff- und Energieströme umgegangen, Planungsunsicherheiten verringert, die Auslegungsgrößen verbessert und die

Betriebskosten gesenkt werden. Des Weiteren bietet die Simulation die Möglichkeit schon vor Umsetzung einer Maßnahme den ökonomischen und ökologischen Nutzen zu quantifizieren und so die Wirtschaftlichkeit einer Maßnahme zu bestimmen.

## 2 Umweltrelevanz

### 2.1 Kurze Beschreibung der Umweltproblematik

Die Wandlung und Nutzung von Energie erfolgt in Deutschland derzeit nicht nachhaltig, da mit diesen Prozessen ein erheblicher Teil aller Umweltbelastungen und -gefährdungen verbunden ist. Neben dem Ausbau der erneuerbaren Energien kommt daher den Themenfeldern Energieeffizienz und dezentrale Energieversorgung eine Schlüsselrolle zu. Sie sind die schnellsten, größten und langfristig preiswertesten Optionen für den Klima- und Ressourcenschutz.

Die stahlproduzierende Industrie hat sowohl über ihren Strom-, Gas-, Koks- und Ölverbrauch einen signifikanten Anteil am globalen Energiebedarf.

Für jede produzierte Tonne Stahl werden 1,9 Tonnen CO<sub>2</sub> emittiert. Die Eisen- und Stahlindustrie verursacht nach Daten der World Steel Association und der International Energy Agency 4 - 5 % der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen [Climate Change Position Paper, World Steel Association, 2010].

Die größten Produzenten von Treibhausgasen bzw. die größten Energieverbraucher in Industriebetrieben sind in der Regel die Maschinen und Anlagen selbst sowie die benötigte Prozesswärme. Hinzu kommen die für die Abführung der überschüssigen Wärme benötigte Kühltechnik, die Heizungs- und Lüftungstechnik sowie die Medienbereitstellung, die einen hohen Anteil am Gesamtenergieverbrauch besitzen und dadurch auch Emissionen verursachen.

Verschiedene Gründe erschweren auf den ersten Blick die Analyse bzw. Umsetzung einer energetischen Prozessoptimierung im Stahlherstellungsprozess:

- Abwärmepotenziale müssen nutzbar gemacht werden,
- oftmals liegt Abwärme auf einem anderen Temperaturniveau vor, als benötigt,
- häufig weichen zeitlicher Anfall und Bedarf voneinander ab,
- Entfernungen zum nächsten Wärmeabnehmer sind zu groß,
- Abwärmeströme sind schadstoffbelastet und müssen gereinigt werden,
- die Kosten für Umbaumaßnahmen etc. rechtfertigen sich auf den ersten Blick nicht,
- die Einhaltung der Prozessstabilität und Produktqualität schränkt die Abwärmenutzung ein.

Eine genauere Betrachtung zeigt, dass die vorhandenen Potenziale durch unterschiedliche Technologien (Energiewandlungsanlagen) genutzt werden können. Vor dem Hintergrund steigender Energiepreise haben Industriebetriebe im Bereich der Abwärmenutzung aus industriellen Prozessen daher ein großes Potenzial zur Energie- und Kosteneinsparung.

Bei der Herstellung von Stahl besteht aus mehreren Gründen ein hoher Energiebedarf. Zum einen wird Energie zum Schmelzen benötigt und zum anderen für die Weiterverarbeitung wie z. B. im Walzwerk, in der Wärmebehandlung und in Richt- und Prüfstrecken als sekundärtechnische Anlagen.

Bisher werden die hohen Abwärmepotenziale nur unzureichend genutzt. Bei der Georgsmarienhütte GmbH wird die vorhandene Abwärme beim Entgasungsprozess der Stahlherstellung (Vakuumbehandlung) genutzt, für die Sauerstoffbereitstellung und zu Heizzwecken eingesetzt. Hierfür wird aber nur ein geringer Anteil verwendet. Die restliche Abwärme wird nicht genutzt. Dies liegt vor allem daran, dass mit zunehmender Anzahl an Wärmerückgewinnungsmaßnahmen die Komplexität steigt. Der Einsatz der Abwärme zur Verstromung erhöht dies, da die Wandlungsanlage für einen wirtschaftlichen Betrieb einen kontinuierlichen Wärmestrom benötigt. Hierüber gibt es aber gerade im zeitlichen Verlauf nahezu keine Information.

Nur durch ein sinnvolles Verschalten verschiedener Abwärmequellen in Verbindung mit einer geeigneten Speichertechnologie kann dies erreicht werden. Die fehlende Information über das wirkliche Potenzial in Verbindung mit den sehr hohen Investitionen führt daher zu einer großen Unsicherheit und ist eines der Haupthemmnisse für die Umsetzung.

## **2.2 Darstellung der umweltrelevanten Ziele (quantifiziert) /Energiebilanz-Modellrechnung**

Insgesamt wurden 2009 weltweit 1.219,7 Millionen Tonnen Stahl produziert (2008 = 1.329,7 Millionen Tonnen). Deutschland ist der siebtgrößte Stahlproduzent mit 32,67 Millionen Tonnen pro Jahr (das entspricht einem Marktanteil von etwa 3 %). Der spezifische Energiebedarf beträgt etwa 1,0 MWh/t was somit einem Energiebedarf von 32.000 GWh pro Jahr in Deutschland entspricht. Bei einem angenommenen Abwärmepotenzial von 5 % und einem mittleren Wirkungsgrad der Wandlungstechnologie von 15 % ergibt sich somit eine erzeugbare Strommenge von 240 GWh. Dies entspricht, bei Annahme der CO<sub>2</sub>-Emissionen des deutschen Strommixes (617 g/kWh), einem Minderungspotenzial von etwa 150.000 t CO<sub>2</sub>-Emissionen.

## **3 4-Punkte-Vorgehensweise zur Ermittlung von Abwärmepotenzialen**

### **3.1 Allgemeines Vorgehen**

Im Projektverlauf hat sich herausgestellt, dass die Prüfung der Nutzungsmöglichkeit einer Abwärmequelle vier Punkte umfasst:

1. Identifikation von Abwärmequellen im Unternehmen
2. Erfassung relevanter Daten
3. Bewertung der Ergebnisse
4. Darstellung der Ergebnisse

Notwendiges Kriterium für die Nutzung industrieller Überschusswärme ist, dass die Abwärmequelle im Unternehmen identifiziert wird, um eine anschließende Prüfung der Abwärmequelle durchzuführen. Dafür notwendige Daten müssen zusammengetragen oder erhoben werden. Ist die Abwärmequelle hinsichtlich ihrer Eigenschaften untersucht, kann damit begonnen werden, diese Daten zu bewerten und anschließend aussagekräftig darzustellen. In diesem Zusammenhang wird das Abwärmepotenzial bestimmt.

Diese vier Punkte sind notwendig, um relevante Abwärmequellen im Unternehmen zu identifizieren. Die identifizierten Abwärmequellen werden anschließend in einem weiteren Schritt auf technische und wirtschaftliche Umsetzbarkeit geprüft. Hierfür ist eine dynamische Simulation entscheidend, um mögliche Schwachstellen zu erkennen.

### **3.2 1-Punkt – Identifikation von Abwärmequellen**

Als Abwärme wird diejenige Wärme bezeichnet, die von einem technischen Gerät oder einer technischen Anlage innerhalb eines technischen Prozess als Abfallprodukt erzeugt, jedoch ungenutzt an die Umgebung abgegeben wird. Abwärmequellen sind folglich genau die technischen Geräte oder Anlagen, die Wärme erzeugen, jedoch ungenutzt freisetzen. Neben Abwärme aus Motoren, Kompressoren und anderen Anlagen nimmt die Prozesswärme den größten Stellenwert ein.

Prozesswärme wird in der Industrie oftmals zum Erwärmen und Schmelzen von Stoffen, Erwärmen von Flüssigkeiten, zum Kochen bzw. Verdampfen und zum Trocknen verschiedenster Materialien verwendet.

Grundsätzlich kommen die Prozesse in Betracht, die auf einem hohen Temperaturniveau ablaufen, denn von hohen Temperaturniveaus kann auf hohe Abwärmepotenziale geschlossen werden. Die Güte von Abwärmequellen ist unternehmensspezifisch zu betrachten, dennoch existieren, wie bereits



erwähnt, charakteristische Prozesse, von denen regelmäßig auf ein nutzbares Abwärmepotenzial geschlossen werden kann.

Vorrangig sind die Prozesse über 500 °C, die vor allem in der Grundstoffindustrie vorkommen, potenzielle Quellen zur Abwärmenutzung. Prozesse zwischen 200 °C und 500 °C, die beispielsweise bei der Herstellung von chemischen Grundstoffen, in Trocknungsprozessen oder beim industriellen Backen üblich sind, lassen auf weitere Potenziale schließen und sollten ebenfalls betrachtet werden. Ein Großteil der Prozessenergie unter 200 °C wird für Trocknungsprozesse genutzt. Auch diese vermeidlich minderwertigen Abwärmequellen beinhalten oft verwertbare Abwärmepotenziale, wobei deren Nutzungsmöglichkeiten mit fortschreitender Abnahme der Prozesstemperatur immer weiter eingeschränkt werden.

Der Wärmebedarf unterliegt in den einzelnen Industriezweigen oftmals unterschiedlichen saisonalen Schwankungen. Industrien, in denen verfahrenstechnische Prozesse ablaufen, verzeichnen einen vergleichsweise gleichmäßigen Bedarf auf einem höheren Temperaturniveau. [vgl. Müller, Engelmann, Löffler, Strauch 2009, S.192]. Diese Tatsache erleichtert die Identifikation möglicher Abwärmequellen und kann die Wirtschaftlichkeit einer Abwärmenutzung verbessern.

### **3.3 2-Punkt – Erfassung relevanter Daten**

Um die Möglichkeiten, entstehende Abwärme nutzen zu können, endgültig beurteilen zu können, ist eine vollständige Beschreibung der Abwärme notwendig. Entscheidend ist jedoch, ein möglichst allgemeingültiges Schema zur Bewertung von Abwärme zu entwickeln, um eine erste Abschätzung des Abwärmepotenzials zu vereinfachen. Der Vorteil eines Bewertungsschemas geht dabei natürlich mit dem Nachteil geringerer Genauigkeit der Analyse einher. Somit werden anfangs Abschätzungen gemacht an Stellen, an denen mehrere Untersuchungen notwendig erscheinen oder Messungen erforderlich sind. Als Kompromiss ergibt sich folgender minimaler Datenumfang, der

einerseits mit relativ geringem Aufwand zusammengetragen werden kann und andererseits trotzdem eine grobe Bewertung der Abwärme zulässt.

Zu diesem minimalen Datenumfang zählen Werte wie Betriebsstunden, zeitlicher Verlauf des Abwärmeeinfalls, Trägermedium der Abwärme, jährlich anfallende Abwärmemenge sowie Abwärmetemperatur. Diese Daten charakterisieren das Abwärmepotenzial einer Abwärmequelle und werden nachfolgend näher erläutert.

Die Betriebsstunden der Abwärme sind in der Regel mit den Betriebsstunden der Anlage identisch. Häufig sind Anlagen mit Stundenzählern ausgestattet, an denen sich die Betriebszeiten ablesen lassen. Ersatzweise können die Betriebsstunden aus den Arbeitszeiten oder dem Produktionsplan des Betriebs abgeschätzt werden.

Für die Beschreibung des zeitlichen Verlaufs des Wärmeeinfalls ist entscheidend, ob die Überschusswärme gleichmäßig und regelmäßig oder unregelmäßig, möglicherweise sogar unter starken Schwankungen anfällt und welche Minima/Maxima tags/nachts bzw. im Sommer oder im Winter anfällt. Es sind demnach folgende Fälle zu berücksichtigen:

- Tagesverlauf
  - Zeitlich konstant,
  - Maximum am Tag,
  - Maximum in der Nacht,
  - Starke, unregelmäßige Schwankungen im Tagesverlauf
- Jahresverlauf
  - Zeitlich konstant,
  - Maximum im Sommer,
  - Maximum im Winter,
  - Starke, unregelmäßige Schwankungen im Jahresverlauf

Hilfreich sind Prozesstemperaturkurven und Produktionsprogramme, um den zeitlichen Verlauf und den damit einhergehenden Abwärmefall zu bestimmen.

Für die Abschätzung des Aufwandes für die Auskopplung der Wärme sowie die Stoffdaten für die Bestimmung des Abwärmepotenzials ist das Trägermedium ausschlaggebend. Zu unterscheiden sind:

- Rauchgas,
- Abluft,
- Wasser,
- Brüden,
- Dampf,
- fest,
- flüssig,
- gasförmig.

Ein entscheidender Faktor für Kosten und Art der Wärmeübertragung ist die Schadstoffbelastung des Trägermediums, welche zusätzlich zu beachten ist.

Die jährlich anfallende Abwärmemenge sollte bekannt sein oder kann aus vorliegenden Daten durch eine bilanzielle Betrachtung errechnet werden. In der Regel handelt es dabei um:

- Massen- oder Volumenströme, welche die Abwärmequelle verlassen,
- ggf. Dichte zur Berechnung des Massenstromes aus dem Volumenstrom,
- spezifische Wärmekapazität des Abwärmeträgers, die wiederum von dessen Zusammensetzung abhängt,

- Temperatur vor und nach dem Wärmeübertrager sowie Daten über latente Abwärmen (durch Phasenänderung oder chem. Reaktionen). Hierzu ist mengenbezogen die latente Abwärme zu addieren.

Somit lässt sich der Abwärmestrom nach Formel 1 berechnen.

Formel 1: Berechnung der Abwärme

$$\dot{Q} = \dot{V} * \rho * c_p * (T_{\text{Abwärme}} - T_{\text{Bezug}}) = [\text{kWh}]$$

- Mit:
- $\dot{V}$  = Volumenstrom [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]
  - $\rho$  = Dichte des Fluides [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
  - $c_p$  = spezifische Wärmekapazität des Fluides [ $\text{kJ}/\text{kg} * \text{K}$ ]
  - $T_{\text{Abwärme}}$  = Temperatur der Abwärmequelle [K]
  - $T_{\text{Bezug}}$  = Temperatur der Abwärmesenke [K]

$T_{\text{Bezug}}$  ist als Parameter gewählt. Dabei kann zwischen drei Temperaturen unterschieden werden:

- Umgebungstemperatur als Bezugstemperatur. Damit wird die nutzbare Abwärme bis auf eine typische Umgebungstemperatur (beispielsweise 20 °C) berechnet.
- Technologietemperatur als Bezugstemperatur. In diesem Fall ist die Temperatur einzusetzen, auf die der Wärmestrom minimal abgekühlt wird, ohne den Einsatz einer gewünschten Technologie (beispielsweise 150 °C – 200 °C beim Einsatz von ORC-Anlagen) auszuschließen.
- Grenztemperatur als Untergrenze, die aus anlagentechnischen Gründen nicht unterschritten werden darf.

Gegebenenfalls ist die Umrechnung verschiedener Zustände des Rauchgases notwendig. Gase (sowohl Brennstoffe als auch Luft) ändern ihr Volumen sehr schnell in Abhängigkeit von Druck und Temperatur. Bei der Auslegung von

Komponenten sowie bei der Nachrechnung bestehender Anlagen müssen Betriebs- und Normzustände umgerechnet werden. Ausgehend von der idealen Gasgleichung [vgl. Baehr, Kabelac 2009, S. 2008f] lassen sich Betriebs- in Normvolumenströme oder umgekehrt umrechnen.

Formel 2: Umrechnung von Betriebs- in Normvolumenstrom

$$V_N = V_B * \frac{273}{T + 273} * \frac{1.013,25 + p_{\bar{u}}}{1} \cdot 0.013,25 = [\text{Nm}^3/\text{h}]$$

Mit:  $V_B$  = Betriebsvolumenstrom [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]  
 $T$  = Temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $p_{\bar{u}}$  = Überdruck [mbar]

Formel 3: Umrechnung von Norm- in Betriebsvolumenstrom

$$V_B = V_N * \frac{T + 273}{273} * 1.013, \frac{25}{1.013,25 + p_{\bar{u}}} = [\text{m}^3/\text{h}]$$

Mit:  $V_N$  = Normvolumenstrom [ $\text{Nm}^3/\text{h}$ ]  
 $T$  = Temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $p_{\bar{u}}$  = Überdruck [mbar]

Die spezifischen Wärmekapazitäten  $c_p$  idealer Gase sind im Allgemeinen komplizierte Temperaturfunktionen. Sie können sehr genau aus spektroskopischen Messungen mit Hilfe der Quantenmechanik und der statistischen Thermodynamik berechnet werden. Die Ergebnisse dieser aufwendigen Berechnungen sind in Tafelwerken zusammengefasst [s. Baehr Kabelac 2009, S. 623ff]. Für die Komponenten von Luft und Verbrennungsgasen existieren Polynome, mit denen die mittlere spezifische Wärmekapazität bis etwa  $2.250^{\circ}\text{C}$  sehr genau berechnet werden kann.

Insbesondere die Temperatur des Abwärmeträgers ist eine entscheidende Eigenschaft. Die Prozesstemperaturen sind dem Anlagenbetreiber im Regelfall bekannt oder werden als Daten erfasst.

### 3.4 3-Punkt – Bewertung relevanter Daten

Zur Bewertung der Abwärmequellen im Unternehmen bietet sich eine Abstufung der eben beschriebenen Kriterien nach Punkten an. Den Ausprägungen werden jeweils Punkte zugeordnet, woraus eine eindeutige Abstufung des Abwärmepotenzials der verschiedenen Abwärmequellen folgt, um eine erste Selektion durchzuführen.

Folgendes Punkteschema wird zu Grunde gelegt.

Betriebsstunden B:

Tabelle 1: Bewertungsschema der Betriebsstunden

Kriterium	Bewertung
$< 1.000 \text{ h/a}$	0 Punkte
$1.000 \leq B < 2.000 \text{ h/a}$	1 Punkte
$2.000 \leq B < 4.000 \text{ h/a}$	2 Punkte
$4.000 \leq B$	3 Punkte

## Zeitlicher Verlauf:

Tabelle 2: Bewertungsschema des zeitlichen Verlaufs

Kriterium	Bewertung
Zeitlich konstanter Tagesverlauf	4 Punkte
Maximum tagsüber	2 Punkte
Maximum nachtsüber	2 Punkte
Starke, unregelmäßige Schwankungen im Tagesverlauf	0 Punkte
Zeitlich konstanter Jahresverlauf	4 Punkte
Maximum im Winter	2 Punkte
Maximum im Sommer	2 Punkte
Starke, unregelmäßige Schwankungen im Jahresverlauf	0 Punkte

## Berechnete Wärmemenge $\dot{Q}$ :

Tabelle 3: Bewertungsschema der berechneten Wärmemenge

Kriterium	Bewertung
$< 200 \text{ MWh/a}$	0 Punkte
$200 \leq \dot{Q} < 500 \text{ MWh/a}$	1 Punkte
$500 \leq \dot{Q} < 1.000 \text{ MWh/a}$	2 Punkte
$1.000 \leq \dot{Q} < 2.000 \text{ MWh/a}$	3 Punkte
$2.000 \leq \dot{Q} < 5.000 \text{ MWh/a}$	4 Punkte
$5.000 \leq \dot{Q}$	5 Punkte

## Abwärmemetemperaturen T:

Tabelle 4: Bewertungsschema der Abwärmemetemperaturen

Kriterium	Bewertung
$< 110 \text{ °C}$	0 Punkte
$110 \leq T < 200 \text{ °C}$	1 Punkte
$200 \leq T < 500 \text{ °C}$	2 Punkte
$500 \leq T < 1.000 \text{ °C}$	3 Punkte
$1.000 \leq T$	4 Punkte

## Trägermedium:

Tabelle 5: Bewertungsschema des Trägermediums

Kriterium	Bewertung
Rauchgas, Wasser, Dampf, Brüden, gasförmig, kondensierend	4 Punkte
Abluft, Abwärme, die durch Verbrennung frei werden	3 Punkte
Sonstige flüssige und gasförmige Medien	1 Punkt
Feststoffe (Wärmeauskopplung schwierig)	-6 Punkte

Das festgelegte Bewertungsschema kann auf alle im Unternehmen anfallenden Abwärmequellen angewendet werden. Das Ergebnis ergibt sich aus der aufsummierten Punktzahl der jeweiligen Abwärmequelle (AQ) gemäß obiger Definition, wobei es durch die unterschiedliche Gewichtung einzelner Faktoren beeinflusst werden kann.



### 3.5 4-Punkt – Darstellung der Ergebnisse

Zur besseren Übersichtlichkeit sollten die Ergebnisse in einer Hitliste dargestellt werden.

Tabelle 6: Beispielhafte Ergebnismatrix für Abwärmequellen

Kriterien / Quelle	AQ 1	AQ 2	AQ 3
Betriebsstunden	3	3	1
Zeitlicher Verlauf	2	1	2
Wärmemenge	2	3	0
Temperatur	3	4	2
Trägermedium	3	3	3
<b>Summe</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>8</b>

Daraus ergibt sich in Tabelle 7 die folgende Hitliste für das Abwärmennutzungspotenzial der Abwärmequellen eines Unternehmens.

Tabelle 7: Beispielhafte Hitliste

Rang	Abwärmequelle
1	AQ 2
2	AQ 1
3	AQ 3

Zur weiteren Analyse bietet es sich an, die Ergebnisse der Matrix (Tabelle 6) als Säulendiagramm darzustellen, wie es Abbildung 1 zeigt.

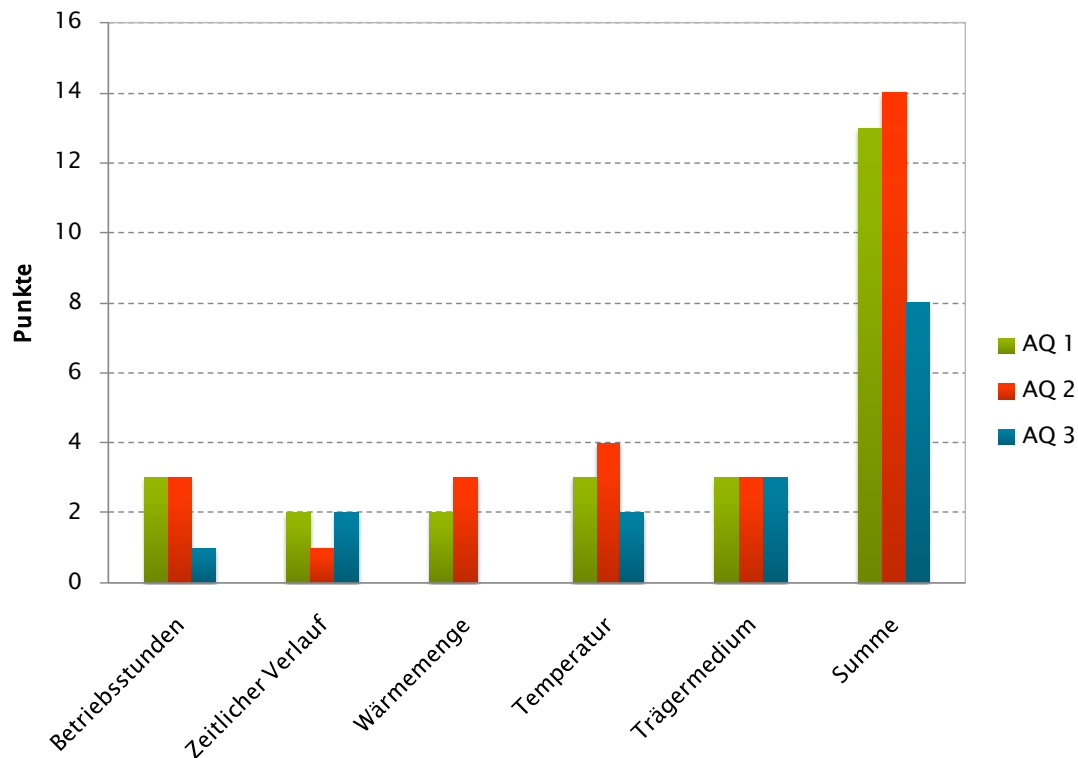


Abbildung 1: Grafische Darstellung der Ergebnismatrix

Auf der x-Achse sind die Kriterien für das Abwärmepotenzial aufgetragen, die y-Achse zeigt die Bewertungspunkte an. Zur besseren Unterscheidung sind die Abwärmequellen farblich voneinander abgegrenzt. Mittels dieser Darstellung kann die AQ mit dem größten Potenzial hinsichtlich der erfüllten Kriterien erkannt werden.

## 4 Vorgehensweise am Beispiel der Georgsmarienhütte GmbH

### 4.1 Identifikation von Abwärmequellen am Beispiel GMH

Im Rahmen einer Prozessbetrachtung wurden Erzeuger (Wärmequellen), aber auch Verbraucher (Wärmesenken) im Unternehmen identifiziert. Hierdurch wird ein Verständnis für die Erzeugungs- und Verbrauchsstruktur aufgebaut.

Zu den konventionellen, nutzbaren Wärmequellen zählen:

- Medienzentrale (3 Dampfkessel)
- Abgaskühlung des Elektrolichtbogenofens (Elo)

Zu den Verbrauchern auf dem Werksgelände zählen:

- Fernheizstationen (FH Ost, FH West, FH Nord)
- Vakuumanlage
- Sauerstoffanlage
- Interne Warmhalte- und Aufheizprozesse (z. B.: Speisewasservorwärmung)

Im Rahmen des Projektes sollen weitere Abwärmequellen identifiziert und quantitativ bewertet werden. Bei den neu betrachteten Erzeugern handelt es sich um

- Schlacke
- Mantel- und Deckelkühlung (Elo)
- Kühlung Pfannenofen
- Strangguss
- Warmhaltegruben
- Blocklager
- Härteöfen (Glühofen 23 + 24)
- Durchstoßofen (Ofen 63)

Abbildung 2 zeigt die relevanten Abwärmequellen und -senken auf dem Werksgelände der Georgsmarienhütte GmbH.



Abbildung 2: Abwärmequellen und -senken auf dem Werksgelände

Abbildung 3 zeigt die grundlegende schematische Darstellung der Wärmeerzeugung (rot), -verbrauch (blau) sowie mögliche Potenziale und deren Einbindungsmöglichkeiten in ein Gesamtsystem.

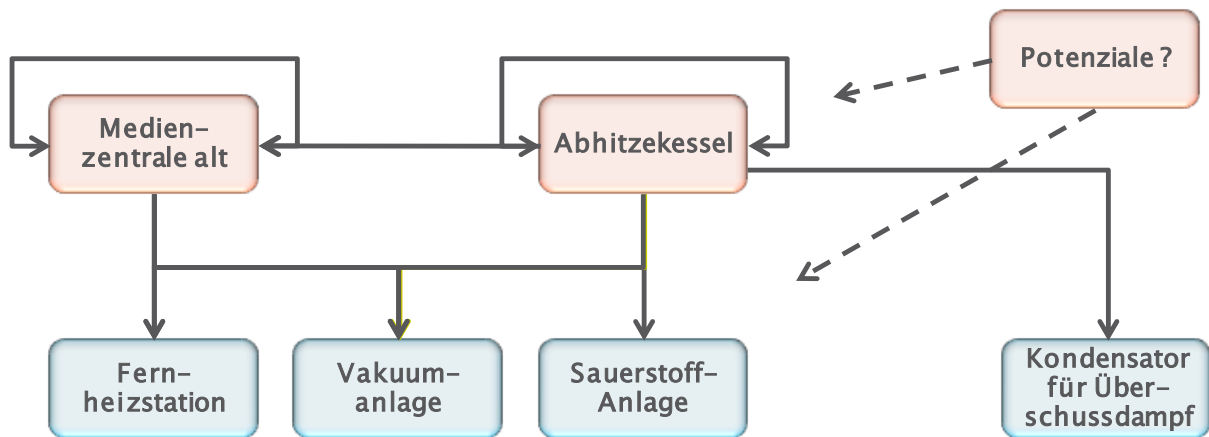


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Wärmeerzeugung, -verbrauch, Abwärmequellen und deren Einbindungsmöglichkeiten in ein Gesamtsystem

Diese Darstellung bildet die Grundlage für das Grundkonzept einer zukünftigen Wärmeversorgung.

## 4.2 Erfassung relevanter Daten am Beispiel GMH

Alle neu betrachteten Wärmequellen wurden auf ihr Abwärmepotenzial und deren Nutzungspotenzial (Betriebsstunden, zeitlicher Verlauf, Abwärmemenge, Trägermedium und Temperatur) untersucht. Als Datenbasis zählen Werte aus dem betriebsinternen Energiedatenerfassungssystem aus dem Jahr 2010 auf Stundenbasis. Dies gilt für die Potenziale:

- Mantel- und Deckelkühlung (Elo)
- Kühlung Pfannenofen
- Härteöfen
- Heißkühlung und Abgas des Durchstoßofens (Ofen 63)

Es existieren im Unternehmen weitere Abwärmequellen, für die keine Daten vom Unternehmen erfasst werden. Hierzu zählen:

- Schlacke
- Strangguss
- Warmhaltegruben
- Blocklager

Um diese Potenziale bewerten zu können, wurden Thermografiebilder gemacht. Mit Hilfe der Daten aus den Aufnahmen sowie in Abstimmung mit den Prozessverantwortlichen konnten die notwendigen Daten gesammelt werden. Abbildung 4 und Abbildung 5 zeigen exemplarisch die Datenerhebung in Blocklager und Stranggussanlage.

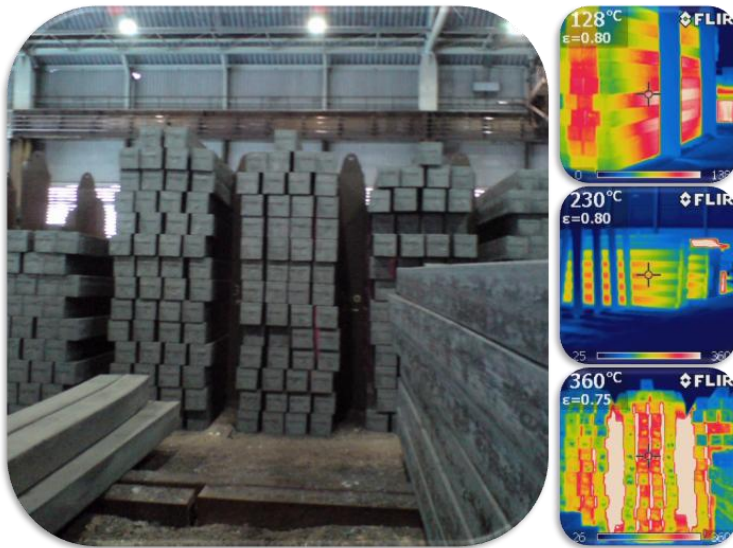


Abbildung 4: Potenzialermittlung mittels Wärmebildkamera (Blocklager)

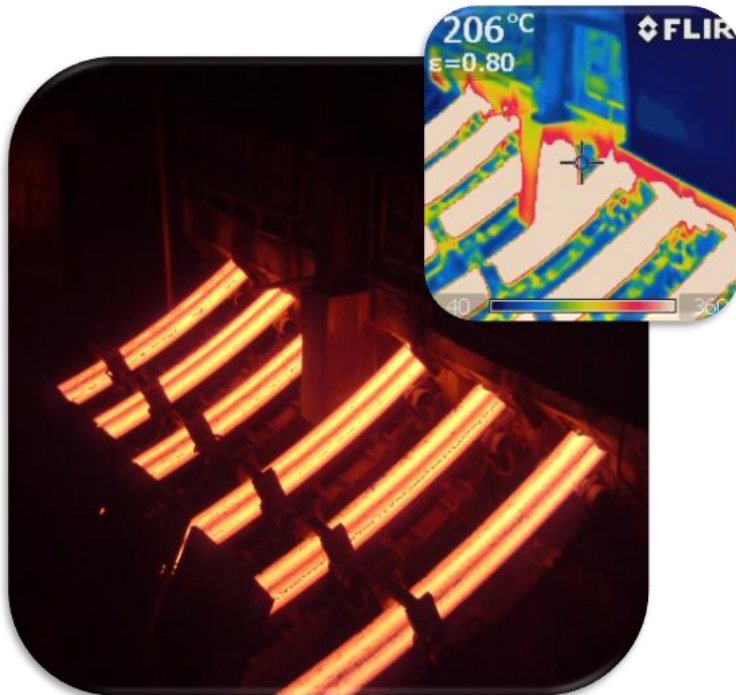


Abbildung 5: Potenzialermittlung mittels Wärmebildkamera (Strangguss)

### 4.3 Bewertung relevanter Daten am Beispiel GMH

Nach Aufnahme aller relevanten Daten wurden zudem die Energieinhalte und theoretischen Abwärmepotenziale der unterschiedlichen Quellen bestimmt. Details können Abbildung 6 entnommen werden.

Quelle	T.niveau [°C]	Trägermedium	Energieinhalt [GWh/a]	Th. Abwärmepotenzial [MW]	Zeitlicher Verlauf
Schlacke	600 – 900	Schlacke	19	3	Intervall
Blocklager	600 – 900	Stahl (fest)	71	4,3*	Kontinuierlich
PO 1+2	Ca. 30	Wasser	11	1,7	Diskontinuierlich
PO 1+2	–	Abluft	–	–	Diskontinuierlich
Ofen 63	80 – 100	Wasser	50	6,3	Kontinuierlich
Ofen 63	400 – 500	Abgas	55	6,9	Kontinuierlich
Glühofen (23+24)	Ca. 700	Abgas	94	17	Diskontinuierlich
Strangguss	Ca. 40	Wasser	> 32	> 5	Kontinuierlich
Strangguss	800 – 1.000	Stahl (fest/flüssig)	2	0,3	Kontinuierlich
Walzwerk	600 – 800	Stahl (fest)	37	5,8	diskontinuierlich
Elo	Ca. 30	Wasser	6	0,9	Kontinuierlich
Elo	70 – 100	Hallenabluft	17	11	Intervall

Abbildung 6: Übersicht der zusätzlichen theoretischen Abwärmepotenziale

\*für einen Block (48 Stück Brammen)

Für die Bewertung von Abwärmequellen sind jedoch nicht nur der Energieinhalt sowie das Abwärmepotenzial von Interesse. Um die Abwärmequellen auch technisch und wirtschaftlich bewerten zu können, sind weitere Kriterien notwendig. Dazu zählen:

- Betriebsstunden (bedeutend für das Abwärmepotenzial im Jahr)
- Temperaturniveau (entscheidend für die späteren Nutzungsmöglichkeiten)
- Trägermedium (Beeinflusst Art und Wirkungsgrad der Wärmeauskopplung)
- Zeitlicher Verlauf (entscheidend für die Nutzungsmöglichkeiten)

Es hat sich herausgestellt, dass zahlreiche Abwärmequellen mit großem Potenzial vorhanden sind (wie beispielsweise Glühöfen oder Blocklager), die allerdings unter Berücksichtigung des aktuellen Stands der Technik nicht rentabel nutzbar gemacht werden können.

#### 4.4 Darstellung der Ergebnisse am Beispiel GMH

Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse der Analyse der Wärmestruktur und die Gegenüberstellung von Wärmequellen und Wärmesenken. Die Säulenhöhe entspricht dem Potenzial als Quelle bzw. Senke. Ofen 63 und die Glühöfen haben demnach das höchste Potenzial.

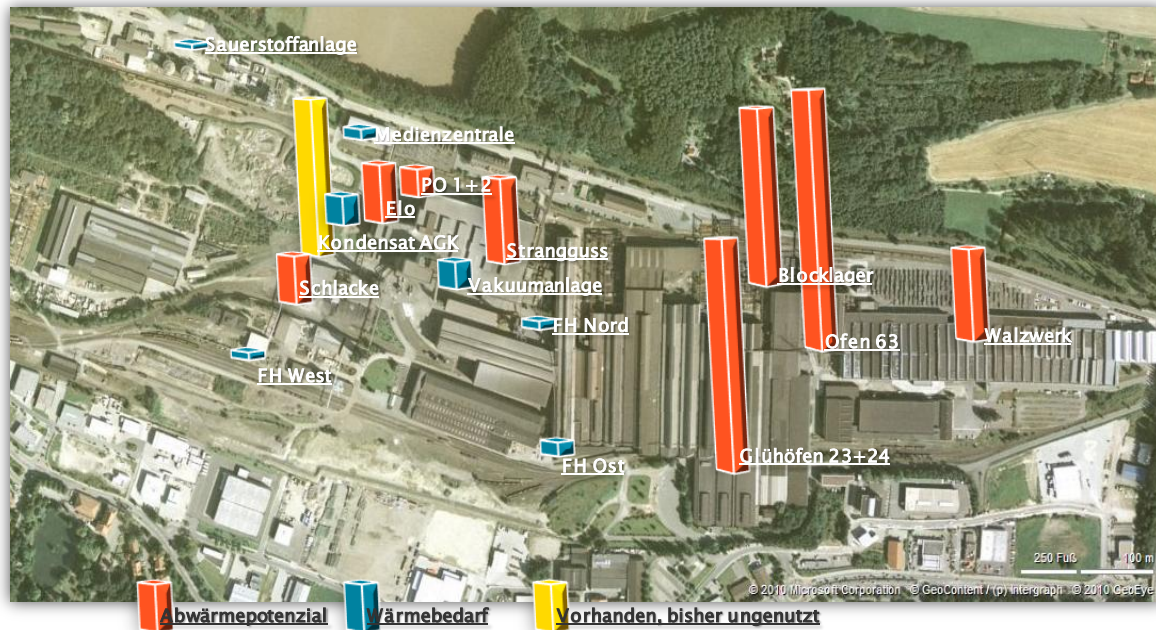


Abbildung 7: Darstellung der Abwärmeequellen und -senken auf dem Werksgelände

Es gilt festzuhalten, dass generell hohe Abwärmepotenziale vorhanden sind. Die Abbildung verdeutlicht, dass mehr Abwärmeenergie vorhanden ist als am Standort als Wärme wieder genutzt werden könnte. In den meisten Fällen ist die Nutzung der Abwärme nicht wirtschaftlich, da der Aufwand zur Auskopplung unter Berücksichtigung des aktuellen Standes der Technik zu hoch oder die Kontinuität der Abwärme nicht gegeben sind.

Sowohl die Abgaskühlung Elo (Abhitzekeessel bzw. kurz AHK) als auch die Heißkühlung des Ofens 63 haben sich im ersten Schritt als nutzbare Potenziale herauskristallisiert. Die Abgaskühlung Elo ist Bestandteil des Konzepts, da das System zur Auskopplung der Abwärme bereits vorhanden ist. Zudem sind die Kriterien aus Abbildung 6 für die Nutzung geeignet. Wobei das Potenzial nicht in Abbildung 6 aufgeführt ist, da es sich um eine bestehende Anlage handelt. Der Prozess liefert zwar diskontinuierlich Wärme,



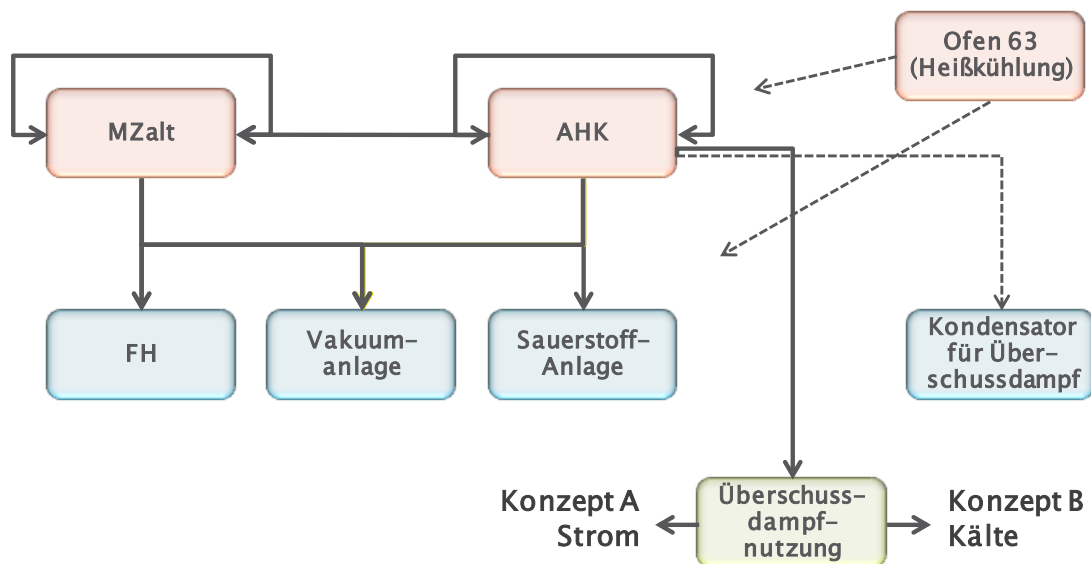
diese Wärme liegt aber auf Grund der Rahmenbedingungen bereits als Dampf mit ca. 13 bar vor und ist deswegen ideal nutzbar.

Die Heißkühlung des Ofen 63 stellt kontinuierlich zwar nur eine Temperatur von ca. 90 –100 °C zur Verfügung, da es sich aber beim Wärmeträgermedium um Wasser handelt ist die Wärmeauskopplung vergleichsweise kostengünstig. Diese Abwärmequelle bietet sich zur Rücklaufanhebung der Fernheizung an. Somit würde mehr energetisch hochwertiger Dampf zur weiteren Verwendung bereitstehen.

Aus den genannten Gründen werden diese beiden Potenziale in der weiteren Bearbeitung berücksichtigt.

## 5 Konzeptentwicklung

Für das ganzheitliche Wärmekonzept gilt es nun die identifizierten Potenziale in das Gesamtsystem einzubinden. Einen ersten Ansatz zeigt Abbildung 8.



- AHK=Abhitzekessel
- MZ=Medienzentrale
- FH=Fernheizstation

Abbildung 8: Schematische Darstellung des Abwärmenutzungskonzeptes

Grundsätzlich stehen unterschiedliche Möglichkeiten zur Verwertung der Abwärme zur Verfügung.

Im Rahmen der Konzeptentwicklung haben sich zwei grundsätzliche Konzepte herauskristallisiert.

Bei Konzept A handelt es sich um eine Lösung zur Verstromung mit folgenden Eckpunkten:

- Heißkühlung Ofen 63 substituiert den Dampf für die Fernheizstationen
- Überschussdampf aus dem AHK wird zur Stromerzeugung in einer Dampfturbine oder einem -motor genutzt
- Abdampf wird auf einem Temperaturniveau von ca. 100 °C in das System zurückgeführt.

Mögliche Technologien für dieses Konzept wären:

1. ORC (Dampfturbine mit organischem Arbeitsmedium) zusätzlicher Wandlungsschritt, dadurch geringerer Wirkungsgrad
2. Dampfkraftprozess
  - a. Turbine mit gutem Wirkungsgrad, bei hohen Durchsätzen. Schwierig bei schwankendem Dampfbedarf und -qualität
  - b. Motor mit relativ gutem Wirkungsgrad, bei moderaten Durchsätzen. Unkritischer bei schwankendem Dampfbedarf und -qualität

Bei Konzept B handelt es sich um eine Lösung mit Kälteerzeugung mit folgenden Eckpunkten:

- Heißkühlung Ofen 63 substituiert den Dampf für die Fernheizstationen
- Überschussdampf aus dem AHK wird zur Kälteerzeugung in einer Absorptionskältemaschine genutzt

Diese Konzepte haben sich herauskristallisiert, da bereits durch Abbildung 7 deutlich wird, dass eine reine interne Wärmenutzung als Wärme nicht möglich ist. Es liegt mehr Wärme vor, als auf dem Werksgelände verbraucht werden kann. Somit stellt die Umwandlung der Abwärme in Strom eine interessante Alternative dar, die es näher zu untersuchen gilt. Auf der

anderen Seite wird am Standort auch Klimakälte benötigt (vorwiegend im Sommer). Mittels Absorptionskältemaschine ist eine Umwandlung der Abwärme in Klimakälte möglich. Aus diesem Grund werden diese beiden Konzepte weiter mittels Simulation auf deren technische und wirtschaftliche Umsetzbarkeit untersucht.

## 6 Simulation

Die relevanten Wärmequellen und -senken sind in einem dynamischen Simulationssystem abgebildet und werden unter Berücksichtigung der erarbeiteten Konzepte untersucht.

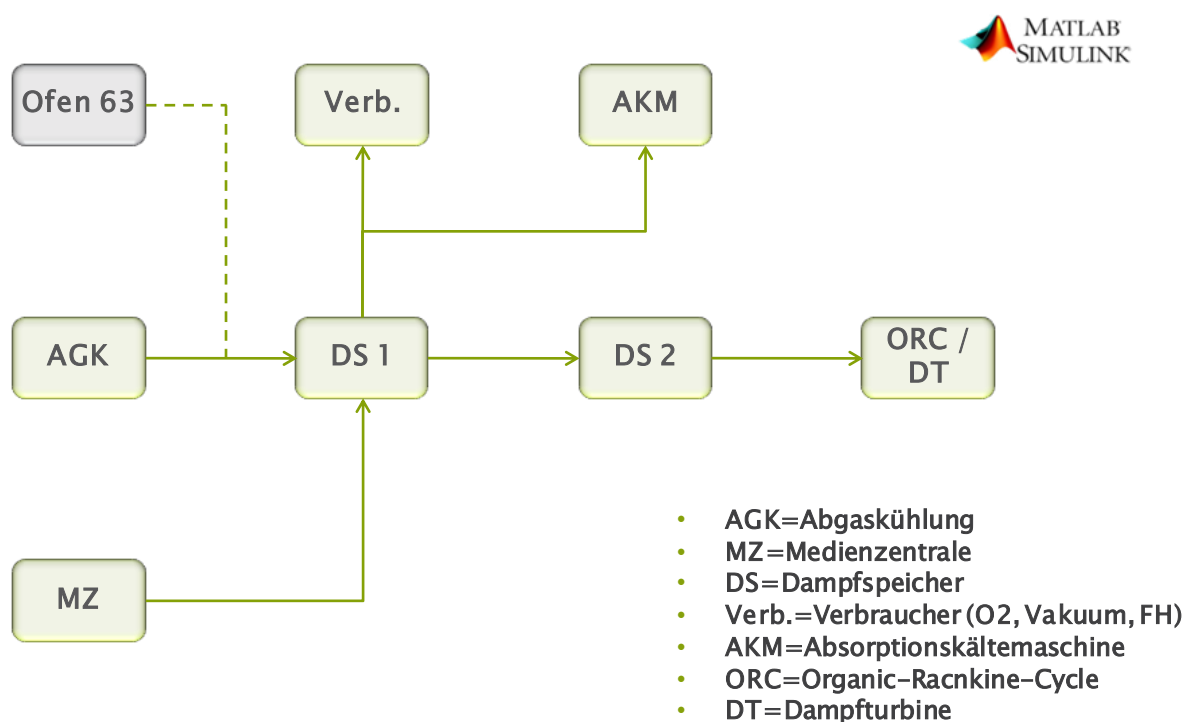


Abbildung 9: Schametischer Aufbau des dynamischen Simulationsmodells

Das Simulationsmodell berücksichtigt alle Komponenten (Abbildung 9). Auf der Seite der Erzeugung speisen die Medienzentrale (MZ), der Abhitzekeessel die Abgaskühlung (AGK) und der Ofen 63 (identifizierte Abwärmequelle nach Potenzialuntersuchung) in das System ein. Wobei der Ofen 63 mit der Heißkühlung nur den Rücklauf der Fernheizstationen anhebt. Aufgrund der

diskontinuierlichen Dampferzeugung der AGK ist ein Speicher zwischengeschaltet, um Produktionspausen abzapuffern.

Auf der Seite der Verbraucher sind Sauerstoff, Vakuumanlage und Fernheizstationen abgebildet. Optional beinhaltet das Modell zur Nutzung der Abwärme eine Anlage zur Verstromung (Konzept A) und eine Absorptionskältemaschine (Konzept B).

In der aktuellen Darstellung werden zwei Speicher verwendet, um die Mengen zu den Verbrauchern und für die Verstromung eindeutig dargestellt werden können. Im Realfall kann es zu einem Speicher zusammengefasst werden.

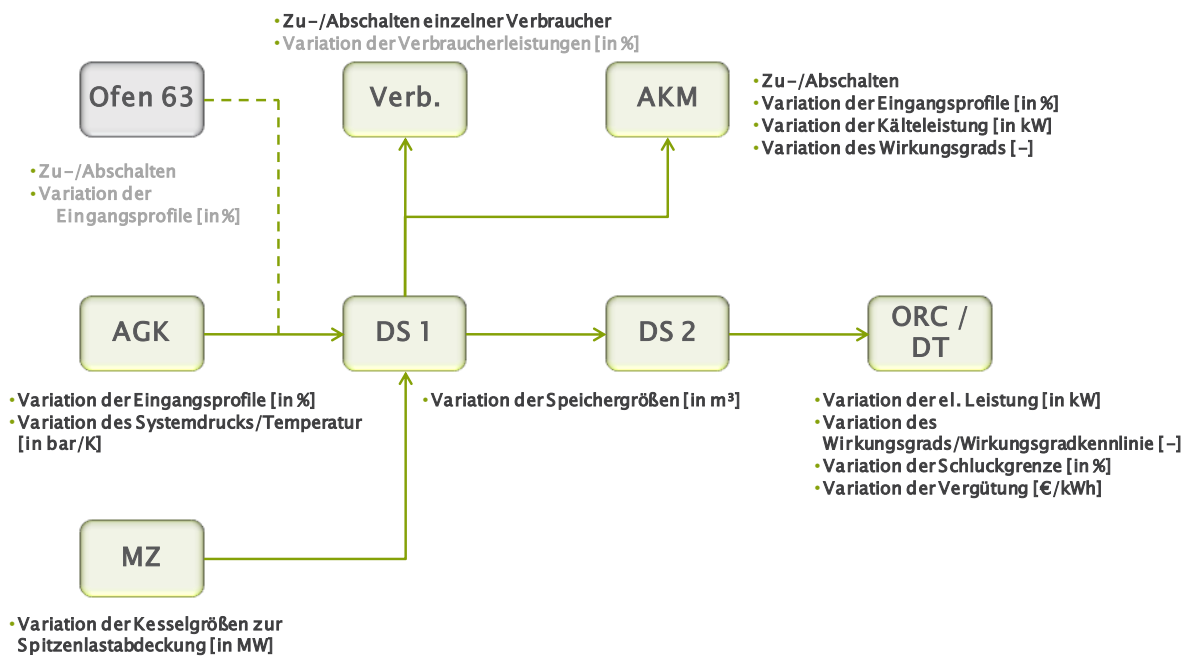


Abbildung 10: Schematischer Aufbau des Simulationsmodells mit Parametervariationen

Abbildung 10 zeigt die Darstellung zu den Variationsmöglichkeiten zu den einzelnen Simulationsbausteinen zur Parametrisierung des Modells in den einzelnen Simulationsläufen.

Die unterschiedlichen Einstellmöglichkeiten zeigen die Komplexität des abgebildeten Systems, da alle Bausteine miteinander verbunden sind und damit in einer gegenseitigen Abhängigkeit stehen.

#### Medienzentrale:

- Variation der Kesselgrößen zur Spitzenlastabdeckung [in MW]

#### Abgaskühlung:

- Variation der Eingangsprofile [in %] (so können Mehr- und Minderproduktion betrachtet werden)
- Variation des Systemdrucks/Temperatur [in bar/K]

#### Ofen 63:

- Zu-/Abschalten
- Variation der Eingangsprofile [in %] (so können Mehr- und Minderproduktion betrachtet werden)

#### Dampfspeicher:

- Variation der Speichergrößen [in m<sup>3</sup>]

#### Verbraucher:

- Zu-/Abschalten einzelner Verbraucher
- Variation der Verbraucherleistungen [in %]

#### Absorptionskältemaschine:

- Zu-/Abschalten
- Variation der Eingangsprofile [in %]
- Variation der Kälteleistung [in kW]
- Variation des Wirkungsgrads [in %]

#### Verstromungstechnologie:

- Variation der el. Leistung [in kW]
- Variation des Wirkungsgrads/Wirkungsgradkennlinie [in %]
- Variation der Schluckgrenze [in %]
- Variation der Vergütung [€/kWh]

So ist es möglich zahlreiche Varianten durchzuspielen und Extremszenarien zu betrachten.

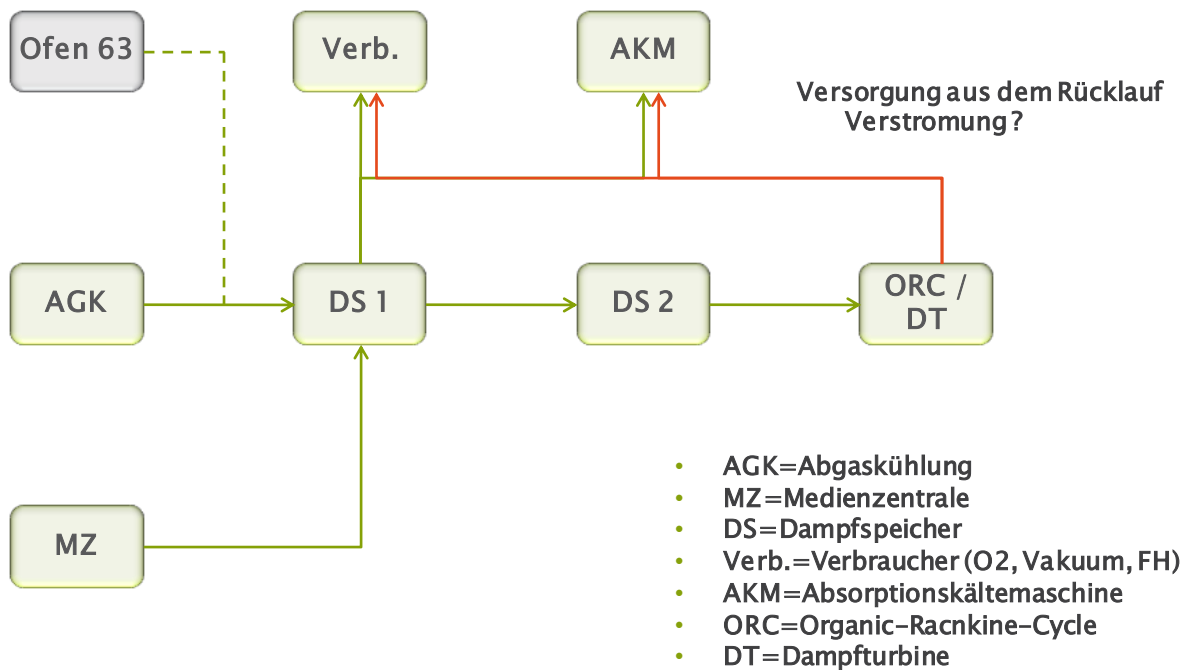


Abbildung 11: Schematischer Aufbau des Simulationsmodells mit Variation der Verschaltung

Abbildung 11 zeigt die unterschiedlichen Möglichkeiten, um die Abwärme nach der Verstromungsanlage zu nutzen.

1. Möglichkeit ist die Versorgung der AKM mit Restwärme nach der Verstromung
2. Möglichkeit die Rücklaufanhebung der FH Ost und ggf. auch FH Nord  
 Durch kurze Veränderungen im Modell kann schnell untersucht werden, welchen Einfluss eine nachrangige Nutzung der Restwärme nach der Verstromung auf die Wirtschaftlichkeit des Gesamtvorhabens hat.

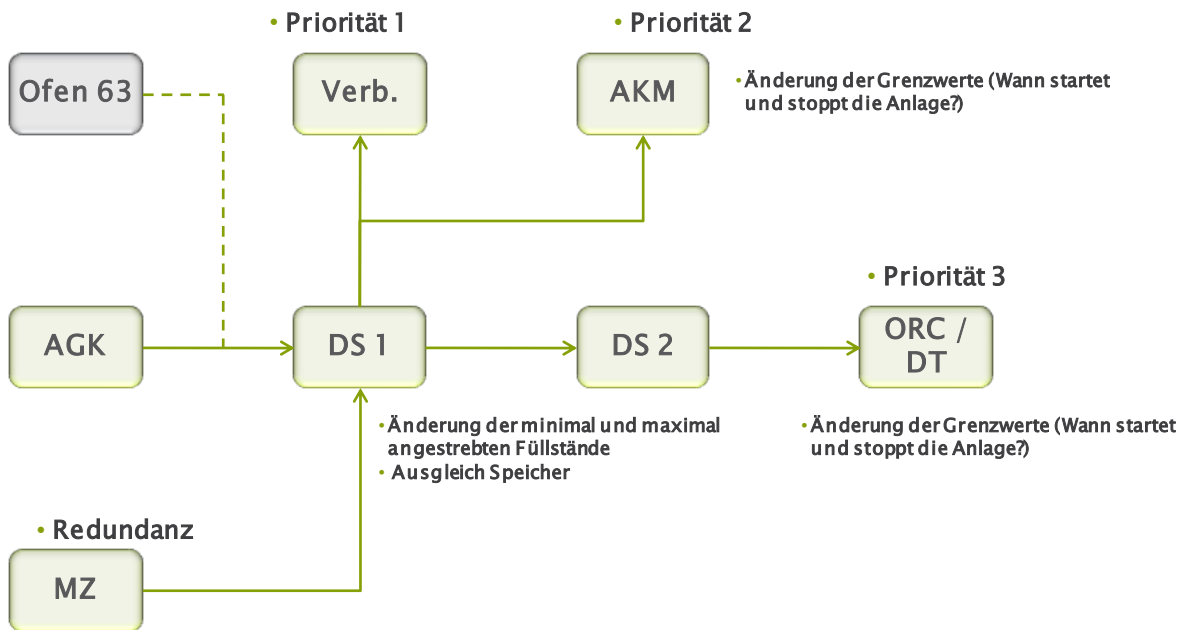


Abbildung 12: Schematischer Aufbau des Simulationsmodells mit Variation der Regelung

Abbildung 12 verdeutlicht die integrierte Rangfolgeregelung einzelner Verbraucher.

1. Priorität hat die Produktion mit dem Fokus auf der Vakuumanlage (15 t Dampf in der Spitze, durchschnittlich 8 t Dampf für ca. 20 Min in einer Stunde, notwendiges Druckniveau 13 bar)
2. Priorität haben die Fernheizstationen und die restlichen Verbraucher in der Produktion (Sauerstoffanlage, zukünftig AKM)
3. Stromerzeugung

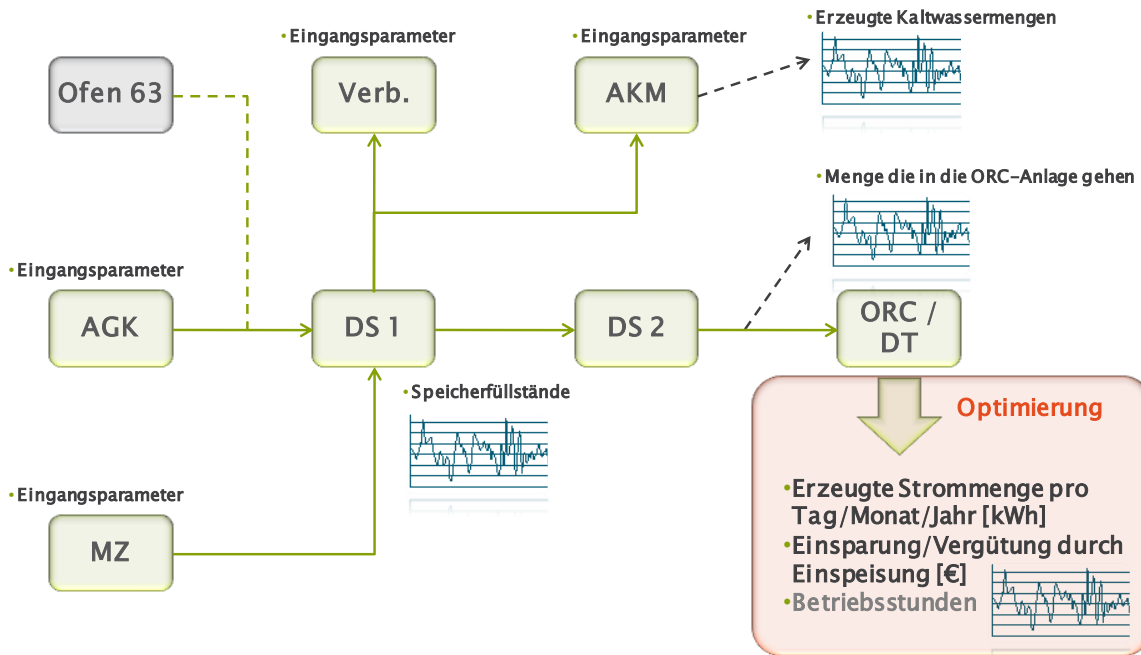


Abbildung 13: Schematischer Aufbau des Simulationsmodells mit Ein- und Ausgabeparametern

Ein- und Ausgabewerte aus der Simulation zeigt Abbildung 13. Grundsätzlich können alle Werte ausgelesen und dargestellt werden.

Die Auswertung beinhaltet zudem eine Ausgabe der Wärmemenge aus dem DS 2 (Dampfspeicher 2). Dieser zeigt die überschüssige Dampfmenge an, die entweder in die Verstromung gehen kann oder anderweitig (z. B. Einspeisen in ein externes Fernwärmenetz) verwendet werden kann.

Ziel ist letztendlich die Optimierung von

- Erzeugter Strommenge (€/a) → Zwingend notwendig für die Wirtschaftlichkeit der Anlage
- Betriebszeit der Verstromungsanlage (h/a) → Zwingend notwendig für die technische Umsetzbarkeit der Anlage

Diese beiden Kriterien sollen mittels optimaler Dimensionierung von:

- Speicher 1
- Speicher 2
- Verstromungsanlage

erreicht werden.



## 6.1 Zielsetzung

Als wirtschaftlich effiziente, praxisorientierte Hilfe für die Darstellung, Identifikation und Bewertung von Abwärmepotenzialen bei der Stahlproduktion der GMH am Standort Georgsmarienhütte wurde ein Simulationsmodell entwickelt. Im vorliegenden Fall bildet das Simulationsmodell den Verstromungsprozess mit Wasserdampf als energietragendes Medium und optionaler Dampfspeicherung ab. Wesentliches Ergebnis des Simulationsmodells ist die Ermittlung des technisch erzielbaren Outputs an elektrischer Energie. Das Modell ermöglicht in einem ersten Schritt die Erfassung und Darstellung des aktuellen IST-Zustands, wodurch Transparenz im Bereich der Problemstellungen entsteht und die richtigen Ansatzpunkte für Optimierungsmaßnahmen aufgedeckt werden. Im zweiten Schritt erfolgt die Darstellung unterschiedlicher Betriebsszenarien bzw. Optimierungsvorhaben. Die Szenarien (Optimierungsmaßnahme) und die damit verbundenen spezifischen Betriebsparameter werden aufgrund vorangegangener Analysen (z. B. Analyse IST-Zustand) definiert. Unter Eingabe der relevanten Parameter in das Simulationsmodell wird das entsprechende Betriebs-Szenario eingestellt, simuliert und dessen Ergebnisse erfasst, wie in Abbildung 14 dargestellt.



internen Energiedatenerfassung der Georgsmarienhütte GmbH zu Grunde.  
Das Simulationsmodell gliedert sich in die Teilbereiche:

- Dampfbereitstellung
- Dampfverbraucher
- Verstromung

Die Darstellung der Dampfbereitstellung und des -Verbrauchs, siehe Abbildung 16, allein geschieht rein datengetrieben und erzeugt als Ergebnis eine Bilanz in der zum einen die Dampfüberschüsse und zum anderen eventuelle Dampfbedarfe des Gesamtprozesses ersichtlich werden. Die Verstromung besteht aus einer Dampfkraftanlage und optionaler Dampfspeichernutzung. Die Darstellung der Bereitstellung elektrischer Energie geschieht hierbei über die Dampfkraftanlage.

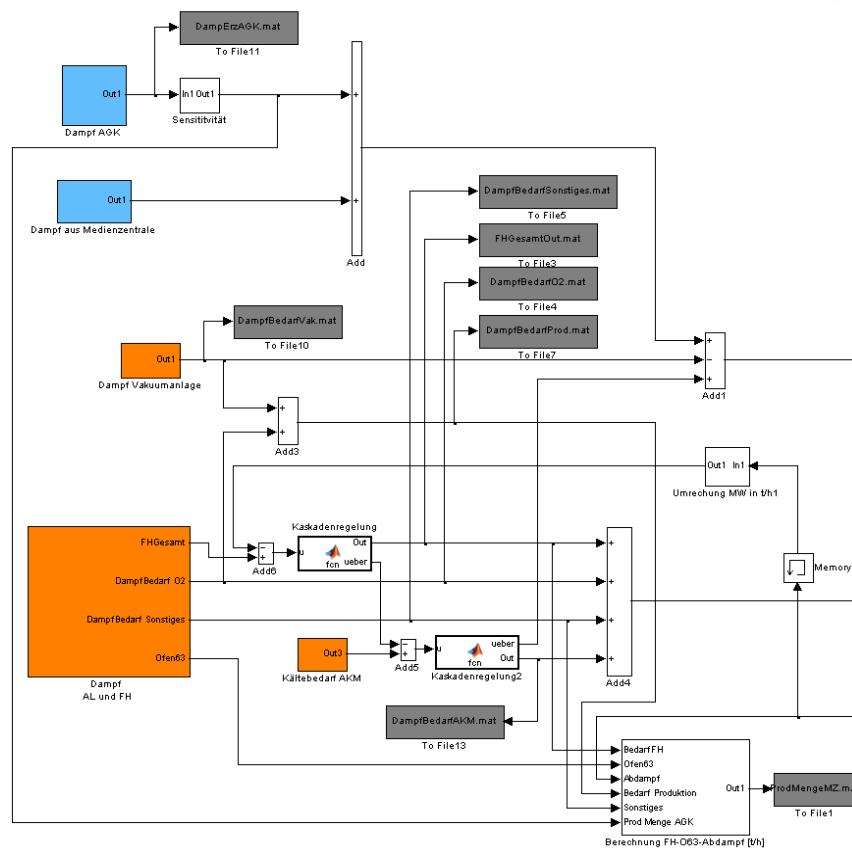


Abbildung 16: Aufbau eines Teilbereichs Dampfbereitstellung u. Dampfbedarf

Die Module Dampfspeicher und Verstromung, wie in Abbildung 17 ersichtlich, sind dynamisch modellierte Systeme. Deren Funktionalität basiert auf den für die Simulation wesentlichen physikalischen Vorgängen von realen Anlagen. Die Übertragung der Mechanismen auf das Modell geschieht unter Anwendung physikalischer Modellbildung und der Verwendung technischer Kenngrößen der realen Vorlagen. Auf Grundlage der bereitgestellten Daten laufen die programmierten Berechnungen zeitabhängig, zeitkontinuierlich und in Echtzeit ab. Das Modell der Verstromung berechnet die Menge an elektrischer Energie in Abhängigkeit der zugeführten Menge an Wasserdampf. Das Modell des Druckluftspeichers kann eventuelle auftretende Schwankungen im Wasserdampfzustrom ausgleichen, indem er eine bestimmte Menge an Wasserdampf vor dem Eintritt in die Dampfkraftanlage speichert.

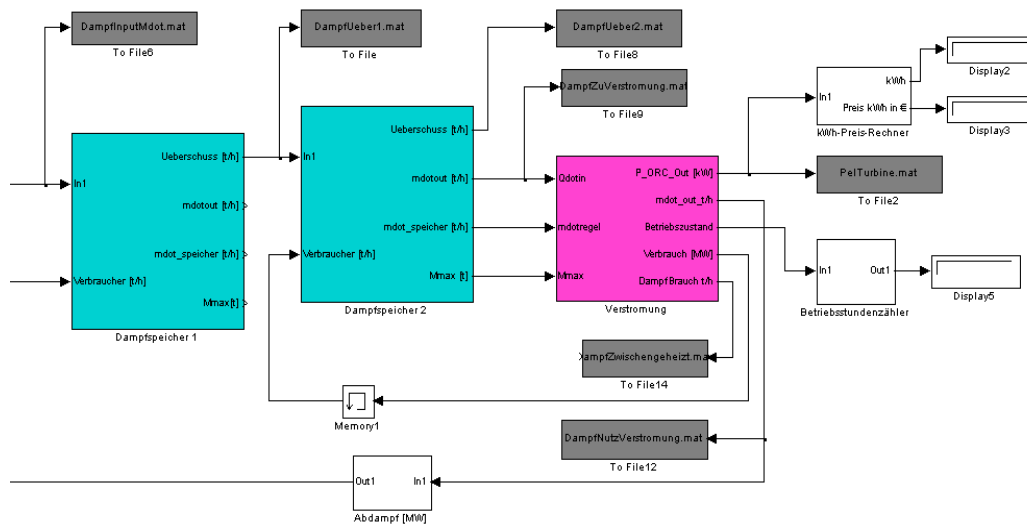


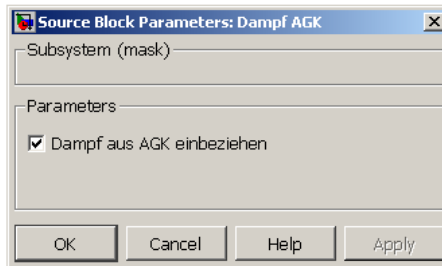
Abbildung 17: Aufbau eines Teilbereichs Dampfspeicherung u. Verstromung

Zur Anpassung des Simulationsmodells an die vorgegebenen Betriebsbedingungen (Szenarien) sind alle relevanten Module mit Eingabemasken versehen. Die hier eingegebenen Werte werden an die entsprechenden Variablen des Quellcodes übermittelt.

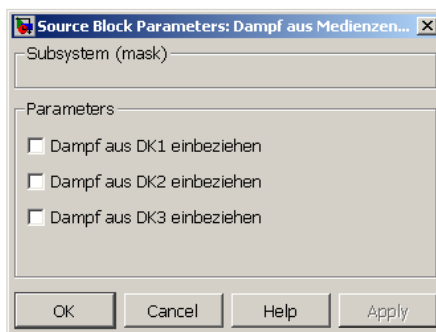
Im Folgenden sind alle Eingabemasken zur Parametrisierung der betreffenden Module aufgelistet:

### Dampferzeugung

- Dampf AGK

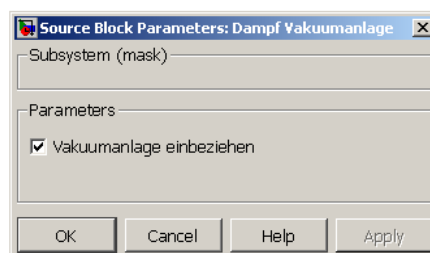


- Dampf aus Medienzentrale

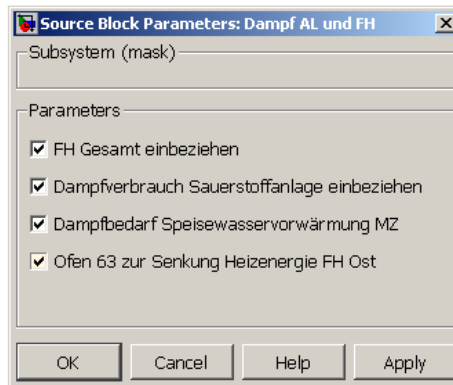


### Dampfbedarf

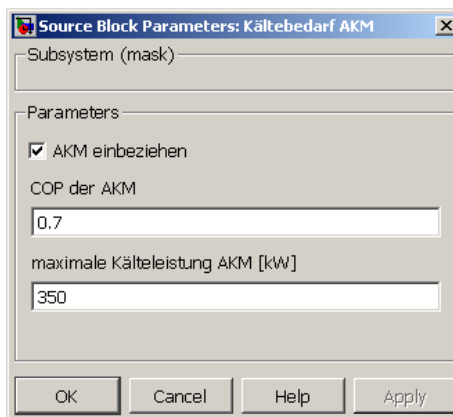
- Dampf Vakuumanlage



- Dampf FH, O2, Ofen 63, Sonstiges



- Kältebedarf AKM



## Verstromung

- Dampfspeicher

Function Block Parameters: Dampfspeicher 1

Subsystem (mask)

Parameters

Dampfmassestart [kg]  
25

Behältervolumen [m<sup>3</sup>]  
50

Enthalpie im geladenen Zustand  
884

Enthalpie im entladenen Zustand  
815

Dichte von Wasser [kg/m<sup>3</sup>]  
856

Dampfenthalpie Austritt  
2786

OK Cancel Help Apply

- Dampfkraftanlage

Function Block Parameters: Dampfspeicher 1

Subsystem (mask)

Parameters

Dampfmassestart [kg]  
25

Behältervolumen [m<sup>3</sup>]  
50

Enthalpie im geladenen Zustand  
884

Enthalpie im entladenen Zustand  
815

Dichte von Wasser [kg/m<sup>3</sup>]  
856

Dampfenthalpie Austritt  
2786

OK Cancel Help Apply

### 6.3 Wesentliche Ergebnisse

Die Auswertung mittels Simulation hat gezeigt, dass

- die Wirtschaftlichkeit stark vom Aufstellungsort und vom Preis des Speichers abhängt
- trotz Variation von Speicher und Größe der Verstromungstechnologie zu viele Start-/Stopppzyklen (ca. 200 Stück bei typischen Systemen) die technische Umsetzbarkeit verhindern. Dies verdeutlicht noch mal Abbildung 18 und zeigt die durchgeführten Simulationen und die jeweiligen Start-/Stopppzyklen.

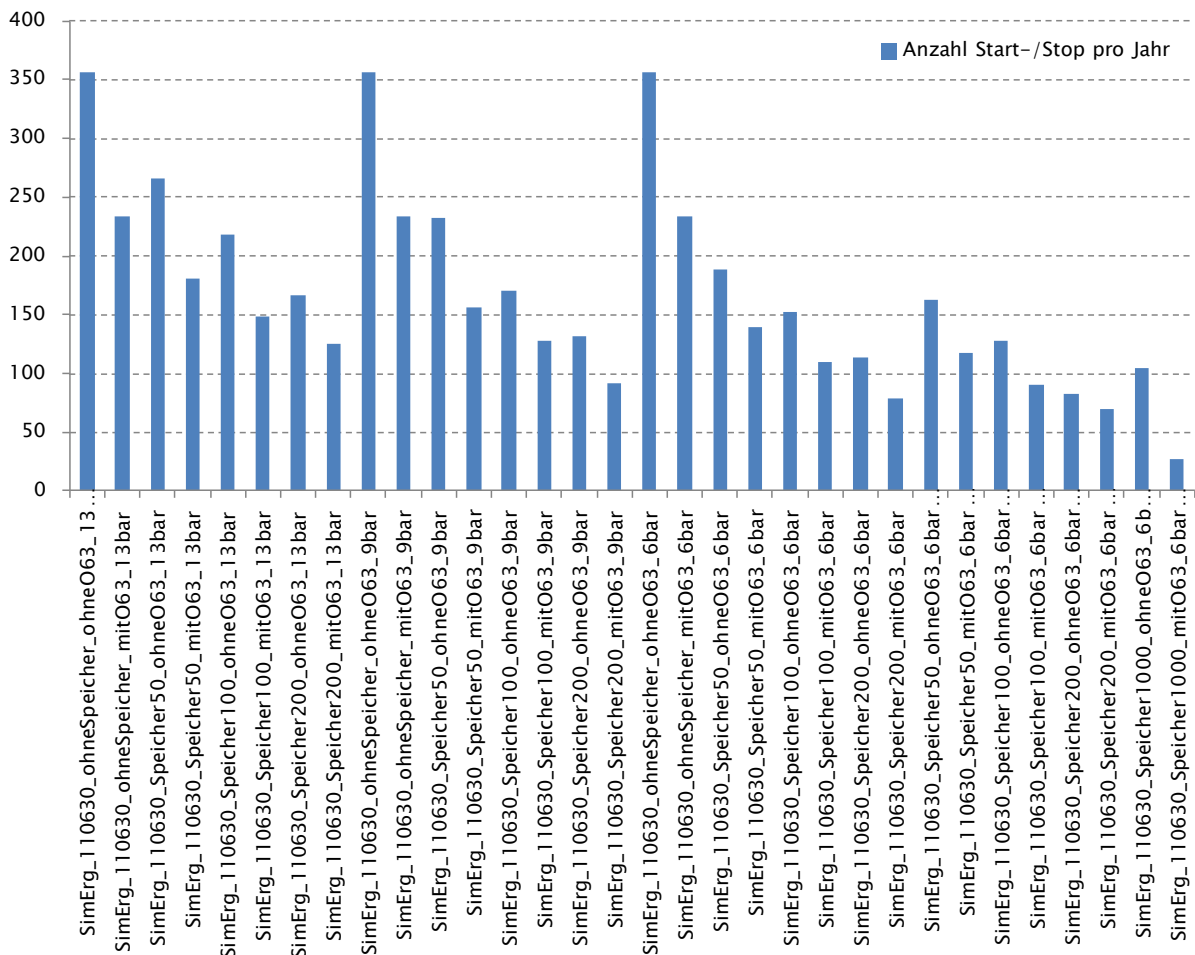


Abbildung 18: Anzahl der Start-/ Stopppzyklen pro Jahr



- ein Zielkonflikt zwischen der Einbindung der Heißkühlung des Ofen 63 und der Abdampfnutzung (Restwärme nach der Verstromung) existiert, der Einfluss auf den möglichen KWK-Bonus hat
- die durchschnittliche Amortisationszeit mit möglichem KWK-Bonus ca. 0,2 Jahre geringer ist als ohne
- sich demnach die Anbindung des Ofen 63 in das bestehende Konzept nicht lohnt
- sich Konzept B unter den gegebenen Voraussetzungen (Kältebedarf ist zu gering) nicht lohnt
- die Kopplung zwischen Konzept A und B im Hinblick auf eine bessere Ausschöpfung des KWK-Bonus sein kann

Aus der Auswertung der Ergebnisse haben sich neue Ansätze entwickelt, die wie folgt lauten:

- Verringerung der Start-/Stopppzyklen durch:
  - Fossiles Zwischenheizen in „Pausenzeiten“
  - Auslegung der Verstromungstechnologie auf Leistungsspitzen der Abwärmemengen und zusätzlich benötigten Dampf aus Dampfkesseln zuheizen
  - Verbesserung/Verfeinerung der Regelstrategien für eine optimierte Fahrweise der Verstromungsanlage
- AKM nach Verstromungstechnologie einsetzen (Konzept A und B koppeln)
- Integration der Leistungsdaten eines weiteren Herstellers im Falle des Zwischenheizens. Hierdurch stellt sich ein kontinuierlicher Wärmestrom ein, der den Einsatz einer Dampfturbine ermöglicht. Bisher wurde auf Grund der Diskontinuität des Wärmestroms lediglich der Einsatz eines Kolbenmotors betrachtet. Nun könnten die Leistungsdaten einer Turbine integriert werden.

Im Folgenden werden die bisherigen Ergebnisse zusammengefasst. Zum einen sind die Ergebnisse der elektrischen Energie der Verstromung mit

Kolbenmotor mit und ohne Zwischenheizen und zum anderen mit Turbine mit und ohne Zwischenheizen. Zudem variieren die Wärmeströme zwischen 11, 22 und 33 t/h.

Abbildung 19 zeigt die Ergebnisse der beschriebenen Varianten.

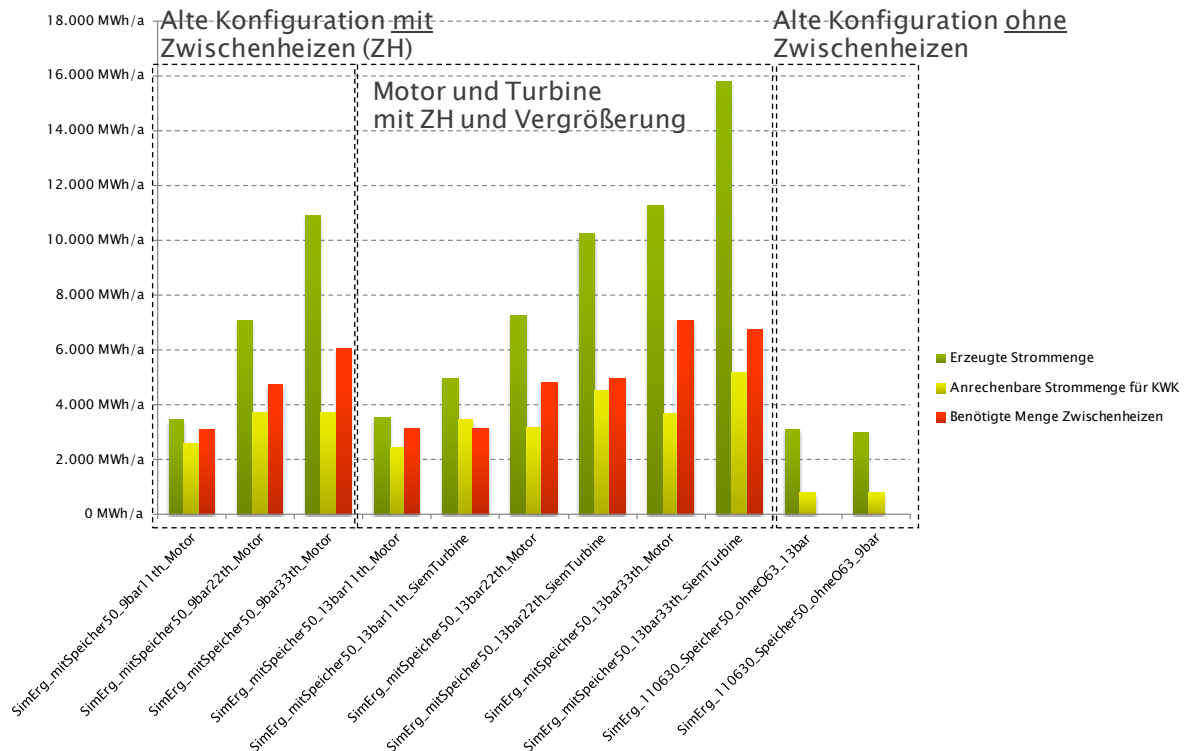


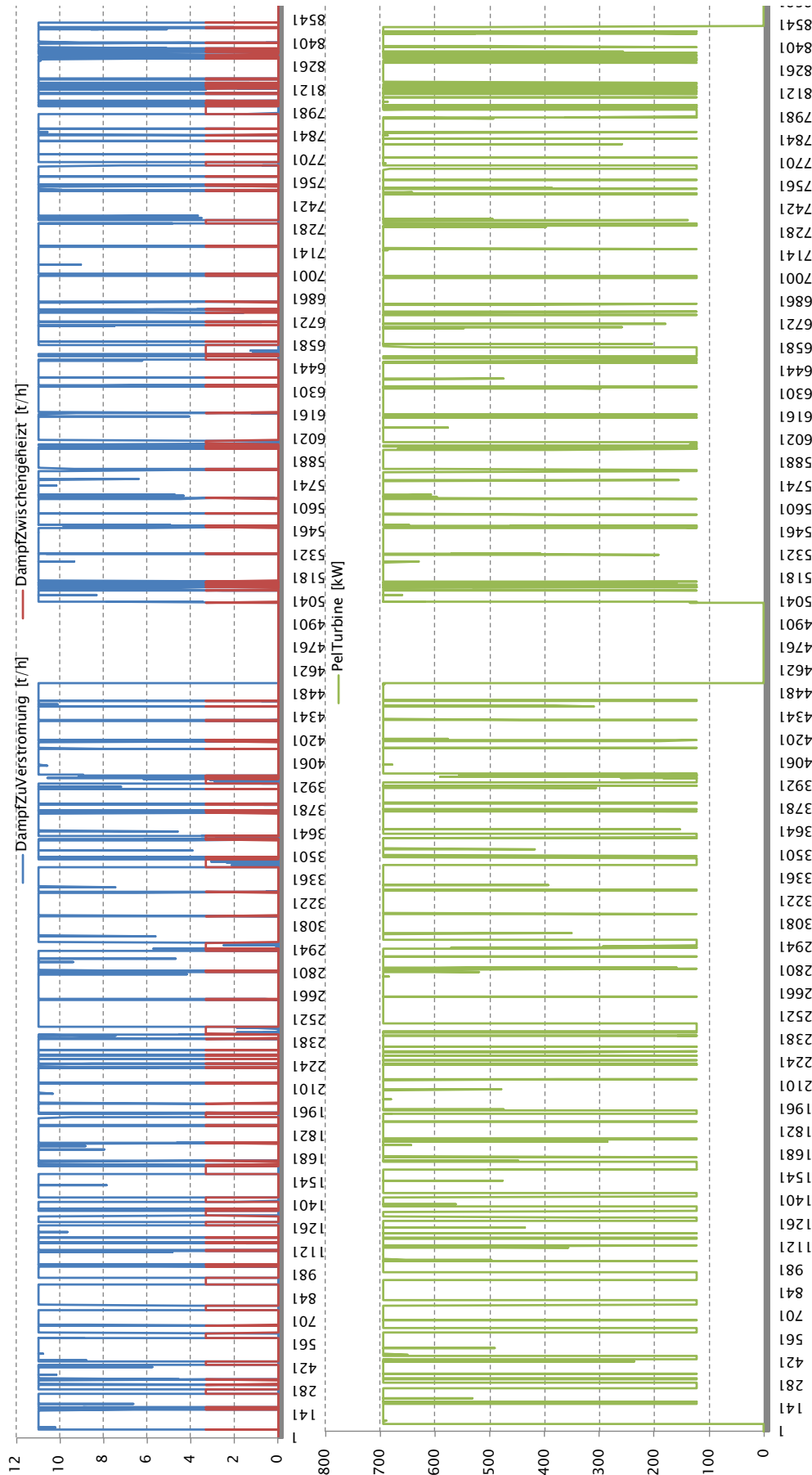
Abbildung 19: Erzeugte elektrische Energie der Verstromungsanlage mit und ohne Zwischenheizen mit Variaten des Dampfdurchsatzes

Es wird deutlich, dass:

- Szenarien mit Zwischenheizen weniger wirtschaftlich als die Szenarien ohne Zwischenheizen sind, da zusätzlich fossile Energieträger eingesetzt werden
- eine Reduktion der Start-/Stopp-Zyklen auf null möglich ist und somit erst eine technische Umsetzbarkeit der Anlage gestattet

Hieraus folgt, dass eine Nutzung der überschüssigen Abwärme nur mit fossilem Zwischenheizen möglich ist. Geringe wirtschaftliche Einbußen werden dabei akzeptiert, da sonst die Abwärme weiterhin ungenutzt an die Umgebung abgegeben werden muss. Diese Erkenntnisse konnten nur gewonnen werden, weil das System mittels dynamischer Simulation untersucht wurde. Dies verdeutlicht exemplarisch Abbildung 20.

Abbildung 20: Ergebnisse der dynamischen Simulation  
 (genutzte Abwärmemenge, Dampfmenge Zuheizen und Stromerzeugung)



Zu sehen sind die zur Verstromung genutzten Abwärmemengen (blau), die zum Zuheizen benötigten Dampfmengen (rot) und unterhalb dargestellt, die parallel dazu erzeugte Strommenge (grün). Auch hier werden die zahlreichen Start-/Stoppzyklen deutlich. Zudem wird sichtbar, dass immer in den Zeiten, in denen nicht genügend Abwärme zur Verfügung steht fossil zwischengeheizt wird. Parallel wird deutlich, dass das gesamte Jahr hindurch Strom erzeugt wird. Ausgenommen die geplanten Stillstandszeiten in Sommer und Winter.

Im Hinblick auf die Umweltrelevanz zeigt sich, dass selbst mit dem Zwischenheizen ca. 1.300 tCO<sub>2</sub>/a durch die Verstromung der Abwärme eingespart werden können, wie in Abbildung 21 ersichtlich.

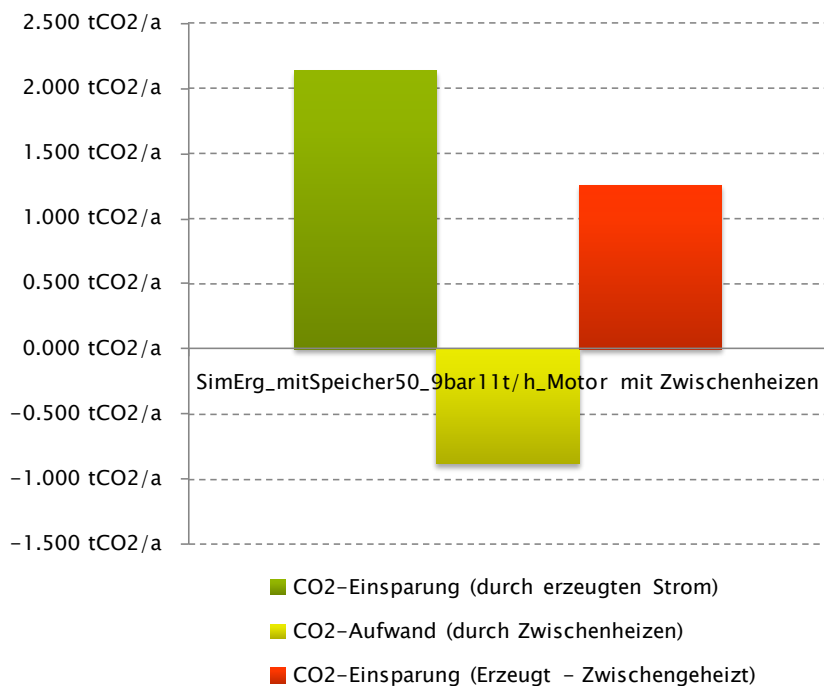


Abbildung 21: Umweltrelevanz in tCO<sub>2</sub>/a

Für diese Berechnung wurde für Strom 0,617 t/MWh und für Erdgas 0,282 t/MWh zugrunde gelegt.

Abbildung 22 veranschaulicht die Erlöse bzw. Kosten (ohne Kapitalkosten), in Euro pro Jahr, des Kolbenmotors mit und ohne Zwischenheizen. Bei der Variante mit Zwischenheizen sind die Kosten für den fossilen Brennstoff (als Kosten für Dampf gekennzeichnet) augenscheinlich. Positiv dargestellt sind

die Erlöse aus erzeugtem Strom, der KWK-Bonus sowie die Summe aus Erlösen und Kosten. Abschließend kann festgehalten werden, dass trotz geringerer Erlöse diese Szenarien mit Zwischenheizen und wirtschaftlich interessant sind und eine technische Umsetzbarkeit erst ermöglichen.

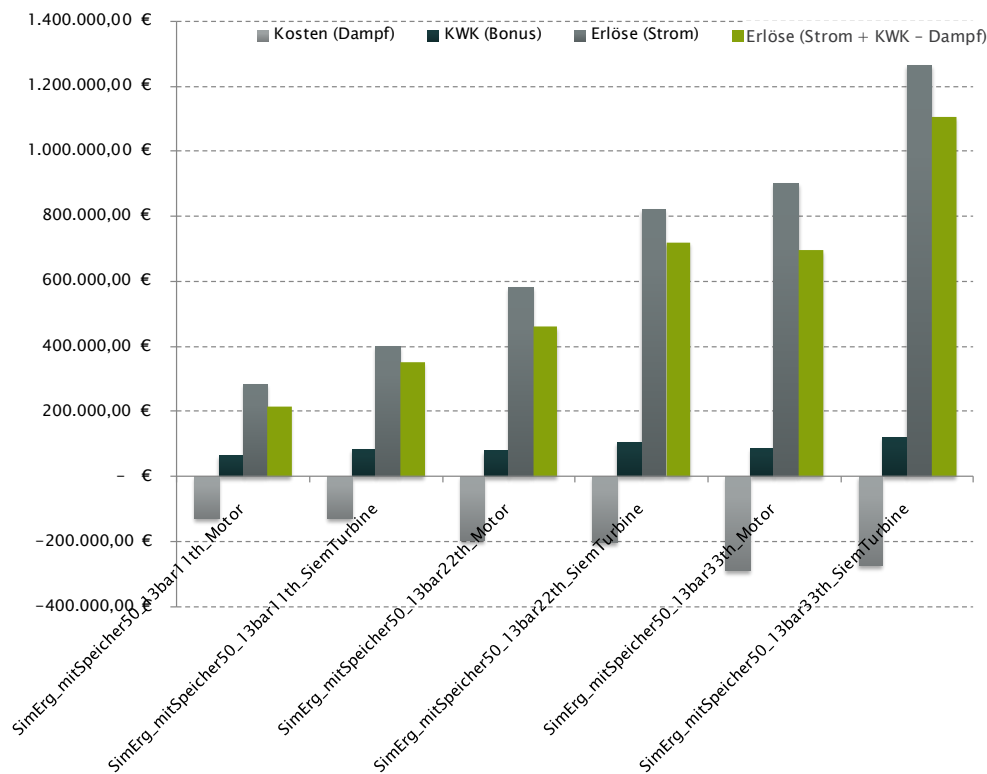


Abbildung 22: Gegenüberstellung des Kolbenmotors mit und ohne Zwischenheizen

Abbildung 23 verdeutlicht den Vergleich von Kolbenmotor und Turbine in Abhängigkeit des maximalen Dampfdurchsatzes in Tonnen pro Stunde. Auf Grund der Wirkungsgradkennlinie ist hier der Einsatz einer Turbine wirtschaftlicher. Mit Zwischenheizen hat die Turbine die bessere Leistungsquarakteristik als der Motor und erzielt im Schnitt ca. 50 % höhere Erlöse bei vergleichbaren Kosten für das Zwischenheizen. Grundsätzlich verbessert sich bei den größeren Durchsätzen die Wirtschaftlichkeit der Anlage.

Entscheidend ist die Reduktion der Start-/Stopp-Zyklen auf Null. Nur hierdurch ist die technische Umsetzbarkeit einer solchen Anlage gegeben. Das ist nur durch fossiles Zwischenheizen möglich.

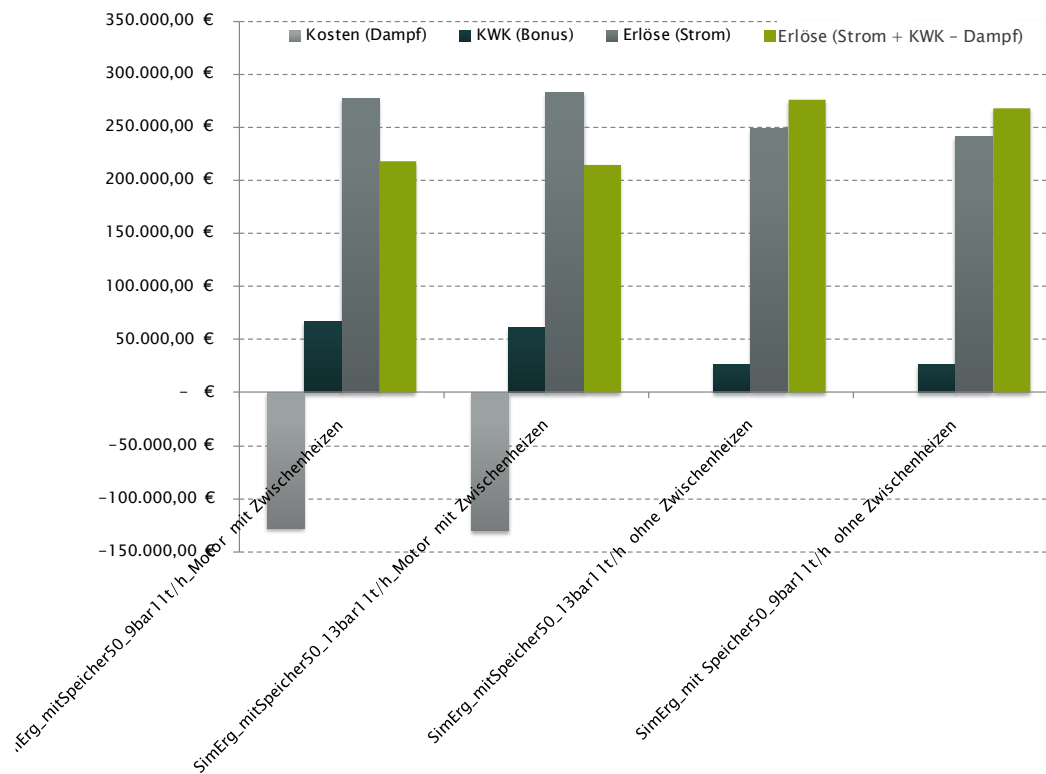


Abbildung 23: Gegenüberstellung von Kolbenmotor und Turbine mit Zwischenheizen

## 7 Erkenntnisse

Zielsetzung des Projektes war es eine strukturierte Vorgehensweise zu entwickeln, die es den Verantwortlichen in den Unternehmen erlaubt, ohne großen Aufwand und ohne tiefes Wissen über das Abwärmepotenzial ihrer Anlagen, die energetischen Einsparpotenziale aufzudecken und zu bewerten.

Die Verantwortlichen sollen über eine einfache Methodik mit Hilfe der 4-Punkte-Vorgehensweise ihre Prozesse auf energetische Potenziale untersuchen.

Dieses konnte aus Sicht der Projektbeteiligten realisiert werden. Für den Anwendungsfall in der Stahlherstellung hat sich gezeigt, dass das Vorgehen, obwohl es sehr unterschiedliche Prozessschritte bewerten soll, erfolgreich angewendet werden kann.

Das Abwärmepotenzial dieser Prozesse lässt sich wiederum durch die Kriterien:

- Betriebsstunden,
- Zeitlicher Verlauf,
- Temperatur,
- Trägermedium und
- Abwärmemenge

relativ schnell und einfach bestimmen.

Weiterhin sollten die vorhandenen Abwärmepotenziale mit einer geeigneten Wandlungstechnologie dezentral zur Stromerzeugung eingesetzt werden. Hierzu ist es bedeutsam diese intelligent zu verschalten, um den Exergieverlust zu reduzieren.

Auf Grund der dargestellten Komplexität in der Produktion und verschiedener Wärmebedarfsprofile ist die Simulation eine zentrale Methode, welche die aktuelle Wärmesituation abbilden kann, Potenziale darstellt und bei der Maßnahmenentwicklung unterstützt. Nur mit einer statischen Betrachtung wären diese verzweigten Zusammenhänge nicht umsetzbar gewesen.

Im Laufe des Projekts hat sich gezeigt, dass anfängliche Konzepte technisch nicht umsetzbar oder bzw. und nicht wirtschaftlich waren. Signifikant war zum einen der Zielkonflikt im Hinblick auf die Ausschöpfung des KWK-Bonus zwischen der Einbindung des Ofens 63 zur Anhebung der Fernheizung und der Abdampfnutzung aus der Verstromungsanlage.

Zudem hat sich gezeigt, dass nur durch fossiles Zwischenheizen die Start-/Stoppzyklen der Verstromungsanlage signifikant verringert werden kann. Weder der Einsatz von Speichern, noch das Verschalten von Abwärmequellen konnte dieses Hemmnis überwinden. Nur durch das fossile Zwischenheizen ist eine Verstromung der Abwärme aus der Abgaskühlung überhaupt technische realisierbar.

Des Weiteren hat die Simulation aufgedeckt, dass es mit Zwischenheizen sinnvoll ist die Verstromungstechnologie möglichst groß auszulegen, um Lastspitzen abfahren zu können.

Mittels Simulation ist es möglich die komplexen Zusammenhänge abzubilden. Somit konnten zahlreiche Schwachstellen, wie beispielsweise die Diskontinuität, aufgedeckt werden. Bei der Detaillierung des Simulationsmodells fiel auf, dass das Vorhaben, komplexe Prozesse in einfache, für den Benutzer überschaubare Standardabläufe zu transferieren und sowohl die technische als auch wirtschaftliche Optimum zu generieren, eine große Herausforderung darstellt. Die Herangehensweise eines Fachmanns für Abwärmenutzungsanalysen ist vielfach zu kompliziert, um in einfache Abläufe und Abfragen transferiert zu werden.

Des Weiteren sind die möglichen Wechselwirkungen einzelner Maßnahmen aufeinander genauer zu untersuchen. Das Simulationsmodell ersetzt nicht die Fähigkeiten eines Fachmanns. Zudem hat sich gezeigt, wie viele Varianten und Einflussparameter eine Abwärmenutzung beeinflussen, die nicht in einem Modell standardisiert werden können.

## **8 Schlussfolgerung und Ausblick**

Abschließend ist festzuhalten, dass die erste Phase gezeigt hat, dass es möglich ist die relevanten Abwärmepotenziale in der Stahlherstellung durch eine strukturierte Vorgehensweise (4-Punkte-Vorgehensweise), aufzuzeigen. Die Prozesse lassen sich größtenteils mit wenigen wichtigen Kriterien, wie beispielsweise Betriebsstunden, zeitlicher Verlauf, Abwärmemenge, Temperatur und Trägermedium) beschreiben. Teilweise sind Daten, trotz der Beschränkung auf die wesentlichen Werte, nicht vorhanden und müssen erhoben werden. In diesem Punkt besteht Entwicklungspotenzial bei verschiedenen Unternehmen der Branche. Hier seien Gießereien, keramische



und glasverarbeitende Industrien genannt. Im Falle der strukturierten Vorgehensweise ist eine Übertragbarkeit auf andere Unternehmen der Branche uneingeschränkt gegeben. Im Bereich der Simulation können grundlegende Prozesse und deren Abhängigkeiten abgebildet werden, deren Optimierung und die Interpretation der Ergebnisse sind jedoch dem Fachmann überlassen. Das Modell ersetzt keine Detailuntersuchung.

## 9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Grafische Darstellung der Ergebnismatrix .....	18
Abbildung 2: Abwärmequellen und -senken auf dem Werksgelände .....	20
Abbildung 3: Schematische Darstellung der Wärmeerzeugung, -verbrauch, Abwärmequellen und deren Einbindungsmöglichkeiten in ein Gesamtsystem .....	20
Abbildung 4: Potenzialermittlung mittels Wärmebildkamera (Blocklager) .....	22
Abbildung 5: Potenzialermittlung mittels Wärmebildkamera (Strangguss) .....	22
Abbildung 6: Übersicht der zusätzlichen theoretischen Abwärmepotenziale .	23
Abbildung 7: Darstellung der Abwärmequellen und -senken auf dem Werksgelände .....	24
Abbildung 8: Schematische Darstellung des Abwärmenutzungskonzeptes ....	25
Abbildung 9: Schematischer Aufbau des dynamischen Simulationsmodells ...	27
Abbildung 10: Schematischer Aufbau des Simulationsmodells mit Parametervariationen.....	28
Abbildung 11: Schematischer Aufbau des Simulationsmodells mit Variation der Verschaltung .....	30
Abbildung 12: Schematischer Aufbau des Simulationsmodells mit Variation der Regelung.....	31
Abbildung 13: Schematischer Aufbau des Simulationsmodells mit Ein- und Ausgabeparametern .....	32
Abbildung 14: Vorgehensweise bei der Simulation.....	34
Abbildung 15: Aufbau des Gesamtmodells in Matlab/Simulink (Details siehe Anhang) .....	34
Abbildung 16: Aufbau eines Teilbereichs Dampfbereitstellung u. Dampfbedarf	35
Abbildung 17: Aufbau eines Teilbereichs Dampfspeicherung u. Verstromung	36
Abbildung 18: Anzahl der Start-/ Stoppzyklen pro Jahr .....	40
Abbildung 19: Erzeugte elektrische Energie der Verstromungsanlage mit und ohne Zwischenheizen mit Variaten des Dampfdurchsatzes .....	42
Abbildung 20: Ergebnisse der dynamischen Simulation .....	43

Abbildung 21: Umweltrelevanz in tCO <sub>2</sub> /a.....	44
Abbildung 22: Gegenüberstellung des Kolbenmotors mit und ohne Zwischenheizen .....	45
Abbildung 23: Gegenüberstellung von Kolbenmotor und Turbine mit Zwischenheizen.....	46

