

# Möglichkeiten und Grenzen bei der Energieeffizienzsteigerung von Thermoprozessanlagen

Dr.-Ing. T. Berrenberg  
ITP GmbH, Aachen, Geschäftsführer  
WSP GmbH, Aachen, Leiter Thermoprozesstechnik

## Einleitung

Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz von Thermoprozessanlagen sollten schon während der Planung durch eine betriebswirtschaftliche Kosten-Nutzenbetrachtung, z.B. mittels der Kapitalwertmethode [1] bewertet werden. Einsparungen an Energiekosten und die Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Produktion stehen zusätzliche Investitionskosten und eine mögliche Verkomplizierung der Anlage gegenüber. Auch kann sich der Anlagendurchsatz verringern. Gefordert werden in der Regel Amortisierungszeiten deutlich unter 10 Jahre.

Es ist zwischen einfachen Maßnahmen, z.B. durch Verringerung des Wandwärmestromes oder Wirkungsgradsteigerung von Ventilatoren und E-Motoren und rekuperativen Maßnahmen zu unterscheiden, bei denen zumindest ein Teil des Verlustwärmestromes wieder in den Prozess zurückgeführt wird. Der Verlustwärmestrom ist bei brennstoffbeheizten Anlagen die Abgasverlustleistung und der Abkühlwärmestrom der dem Gut bei der Abkühlung zum Abschluss des Behandlungsprozesses wieder entzogen wird. Ein Sonderfall ist die Kraft-Wärmekopplung, bei der die Abwärme der Stromerzeugung als Prozesswärme genutzt wird [2].

## Einfache Maßnahmen

Bei einfachen Maßnahmen steht die Optimierung des Isolierwandaufbaus an erster Stelle. Bei der Auswahl von Isolierwerkstoffen und dem Schichtaufbau sind nicht nur die Betriebstemperatur sondern bei Schutzgas mit höherem Wasserstoffgehalt auch der Gaseinfluss auf die Wärmeleitfähigkeit und die Beständigkeit der Isolierung zu beachten. Mit dem Einbau einer nur 20 mm bis 30 mm dicken Schicht mikroporöser Dämmung lässt sich bei 1000°C Ofenraumtemperatur eine Absenkung der Außenwandtemperatur um ca. 10 K erreichen, siehe Bild 1. Die Isolationswärmeverluste lassen sich durch diese Maßnahme um 20% verringern, so dass sich die zusätzlichen Investitionskosten für das mikroporöse Dämmmaterial bei Öfen, die dauerhaft betrieben werden, in wenigen Jahren amortisieren.

Eine weitere einfache Maßnahme ist die Verwendung energieeffizienter elektrischer Antriebe mit bis zu 10% Wirkungsgradsteigerung für Aggregate mit hoher Einschaltdauer, wie z.B. Umwälzventilatoren. Die Amortisationszeiten betragen wenige Monate und selbst der Einsatz von EFF1 anstelle von EFF2-Motoren mit nur 2% - 3% Wirkungsgradsteigerung amortisiert sich in 1-2 Jahren.

Bei Anlagen mit Gasumwälzung lohnt sich im Kühlteil die Reduzierung der Strömungsverluste durch günstige Gestaltung der Strömungsführung und die Erhöhung des Einbau-Wirkungsgrades von Ventilatoren.

Besonders effektiv ist die Verwendung eines hohen Wasserstoffgehaltes im Schutzgas, da auf diese Weise der Wärmeübergang beim Erwärmen und Abkühlen erheblich gesteigert werden kann, während sich die erforderliche Strömungsleistung drastisch verringert. Dies ist ausführlich in dem Beitrag „Schutzgasanwendungen in der Ofentechnik“ erläutert.

### **Energie-Rekuperation in Feuerungsanlage**

Eine rekuperative Maßnahme ist die Abgaswärmenutzung zur Verbrennungsluftvorwärmung der Feuerungsanlage. Hier sind Brenner mit integriertem Rekuperator oder Regenerator den Warmluftbrennern, die mit vorgewärmter Luft aus einem Zentralabgasrekuperator betrieben werden, wegen des höheren Wirkungsgrades und der einfacheren Gemischregelung, vorzuziehen. Die Mehrkosten bei Verwendung von Rekuperativbrennern und Regenerativbrennern sind im Verhältnis zur Heizkostenersparnis gering, so dass sich kurze Amortisationszeiten ergeben.

### **Nutzung der Energie aus der Gutkühlung**

Ein hohes Energieeinsparpotential von 30% bis 40% bietet die Nutzung der Energie aus der Gutkühlung zur Gutvorwärmung [3]. Die Aufgabe bei der Auslegung einer Thermoprozessanlage mit Nutzung der Gutabwärme zur Gutvorerwärmung besteht darin, unter Beachtung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik, der aussagt, dass es Wärme nicht von selbst von einem Körper niedriger Temperatur auf einen Körper hoher Temperatur übergehen kann. Die Ingenieuraufgabe besteht also darin einen geeigneten Wärmeübertragungsprozess zu entwickeln, bei dem ein Teil der Gutwärme bei der Abkühlung auf einen Wärmeträger übertragen wird, der mit einer möglichst hohen Temperatur den Kühlteil der Anlage verlässt, so dass sich ein Teil der im Wärmeträger gespeicherte Energie auf das noch kalte Gut am Anfang des Heizteils der Anlage übertragen lässt. Hierbei sind besonders die zu erzielenden Wärmeübergangskoeffizienten und Wärmeaustauschflächen bei der Auslegung des Wärmeträgerkreislaufs zu beachten.

### Durchlauföfen

Bild 2 zeigt ein Schema für einen Durchlauföfen. Der dem Gut, in diesem Fall einem durchlaufenden Band, im Kühlteil durch erzwungene Konvektion entzogene Wärmestrom wird z.B. mit einem Beblasungsgasstrom in den Vorwärmteil eingeleitet und dort ebenfalls durch erzwungene Konvektion zweckmäßig in mehreren Stufen auf das Gut zur Vorwärmung übertragen. Danach wird der abgekühlte Gasstrom in den Kühlteil zurückgeführt. Statt durch einen Gasstrom kann die Abkühlwärmerückführung auch durch einen Wärmeträger wie Thermoöl erfolgen. In Verbindung mit einem Wärmespeicher ist dann die Reaktion auf sich rasch ändernde Betriebszustände möglich.

In der Tabelle in Bild 2 sind Produktionsdaten und eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für ein Fallbeispiel angegeben. Als Beispiel wird eine Durchlauf-Wärmebehandlungsanlage für Buntmetallbänder gewählt. Die Glühguttemperatur beträgt  $610^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ K}$  bei einem Durchsatz von 140.000 t/a bei 7000 h/a Produktionszeit. Verglichen wurden für 100 % Durchsatz und 90 % Durchsatz die Energieverbräuche ohne Abkühlwärmenutzung und mit Abkühlwärmenutzung durch Beblasungsgasaustausch zwischen Kühlteil und Vorwärmteil sowie die Wärmerückführung mittels eines Thermoöl-Kreislaufs. Für die betriebswirtschaftliche Abschätzung wurden für den Beblasungsgasaustausch zusätzliche Investitionskosten von 500.000 € und für den Thermoöl-Kreislauf von 750.000 € angenommen. Die Kosten für  $\text{CO}_2$ -Verschmutzungsrechte sind berücksichtigt. Die Ergebnisse sind in der Tabelle in Bild 2 zusammengestellt. Durch die Abkühlwärmenutzung steigt die Bandaustrittstemperatur hinter dem Gaskühlteil geringfügig um ca. 30 K an, was jedoch unbedenklich ist, da bei derartigen Anlagen, die unter Schutzgas betrieben werden, hinter dem Gaskühlteil eine Wassertasse angeordnet ist, die bei entsprechender Auslegung und Gestaltung diese zusätzliche Kühlanforderung problemlos erfüllen kann.

Die prozentuale Energieeinsparung ist bei reduziertem Durchsatz höher als bei 100 % Durchsatz. Die absolute Energiekostensparnis ist bei 100 % höher als bei reduziertem Durchsatz, gleiches gilt hier für die Amortisationszeit. Generell gilt, dass eine höhere anteilige Energieeinsparung durch Abkühlwärmenutzung im Prozess Glühkapazität kostet. Insgesamt erscheinen die Amortisationszeiten akzeptabel, weil zwar prozentual weniger Energie eingespart wird, aber insgesamt wegen der höheren Produktionsleistung der Energieeinsatz höher ist.

### Einsatzofenanlage

Im Falle eines Einsatzofens mit ruhendem Gut ist ein regenerativer Wärmespeicher, wie im Schema Bild 3 gezeigt, vorzugsweise mit mehreren Kammern mit unterschiedlichen Temperaturen erforderlich. Als Speichermedien eignen sich einfache, vom Beblasungsgas umströmte Stahlplatten.

In dem Fallbeispiel, Tabelle in Bild 3, wird ein indirekt gasbeheizter Kammerofen, ein so genannter Ein-Coil-Ofen, für ein Aluminium-Coil mit den Abmessungen  $B = 1,34\text{ m}$ ; Außendurchmesser = 2,4 m und Innendurchmesser = 0,6 m und einer Masse von 20 t betrachtet. Die Glühung erfolgt unter Schutzgas auf eine Temperatur von  $580^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ K}$ . Nach Abkühlung auf  $100^{\circ}\text{C}$  wird das Coil dem Ofen entnommen. Die Abkühlwärmenutzung durch regenerative Speicherung mit einem dreiteiligen Regenerativspeicher bestehend aus 5 mm dicken Stahlplatten mit einer Gesamtmasse von 20 t. Die Kosten für Speicher, Schutzgaskanäle, Klappen und steuerungstechnischen Aufwand wurden auf 100.000 € geschätzt. Die Betriebsdaten für die verschiedenen Betriebsweisen sind in der Tabelle zusammengestellt. Darin werden die Betriebsdaten für 100% Durchsatz ohne Abkühlwärmenutzung denen bei reduziertem Durchsatz von 92% und 76% mit entsprechend verlängerten Zykluszeiten gegenübergestellt. Die Zykluszeiten werden um so länger, je mehr Abkühlwärme zurückgeführt werden soll, da sich die Auf- und Abkühlzeiten verlängern.

Bei den heutigen Energiekosten incl. der CO<sub>2</sub>-Verschmutzungskosten liegen die spezifischen Energiekosten für die Glühung der Coils ohne Kühlwärmenutzung bei 14 €/t. Trotz einer Energierückführung von 25% bis 30% der Netto-Heizwärme und der damit verbundenen deutlichen Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emission ergeben sich unwirtschaftlich lange Amortisationszeiten. Erst bei einer Energiekostensteigerung um den Faktor 3 wird die Verwendung eines Regenativspeichers rentabel.

### Haubenofenanlage

Bei mehreren parallel betriebenen Ofenkammern wie z.B. bei einer Haubenofenbatterie können Kammern, in denen Gut abgekühlt wird, mit Kammern verbunden werden, in denen die Aufheizung stattfindet. Der Energierückführgrad steigt mit abnehmender Gutkühlrate, da so ein Teil der Kühlwärme bei hohem Temperaturniveau zur Gutvorwärmung genutzt werden kann.

Zur Abschätzung der Effektivität der Abkühlwärmenutzung wird eine 10-Sockel-Haubenofenanlage mit einer Stapelmasse je Sockel von 90,4 t und einem Maximaldurchsatz von 140.000 t/a bei 7.000 Betriebsstunden/a betrachtet. Mit der 10-Sockel-Anlage lassen sich bei aktivierter Abkühlwärmenutzung noch max. 90% des Durchsatzes erreichen. Um 100% Durchsatz zu erzielen ist ein zusätzlicher Sockel erforderlich. Die zusätzlichen Investitionskosten werden mit 1.000.000 € abgeschätzt.

Die Abkühlwärmenutzung, die je nach Betriebsweise zwischen 17% und 33,5% Energiekosten einspart, erscheint bei einer Haubenofenanlage bereits wirtschaftlich sinnvoll, da sich die Investition im günstigsten Fall bereits nach 3, im schlechtesten Fall nach 6 Jahren amortisiert. Aufgrund der hohen jährlichen Glühleistung lassen sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen erheblich reduzieren.

### Zusammenfassung Nutzung der Gut-Abkühlwärme zur Gut-Vorwärmung

Durch die Umsetzung solcher Konzepte werden viele Prozess- und Anlagenparameter wie Durchsatz und Anlagenlänge beeinflusst. Die Glühkurven müssen modifiziert werden, ohne die Produktqualität zu beeinflussen. Die Umwälzung des Wärmeträgermediums erfordert zusätzliche Aggregate und die Prozessregelung wird komplexer. Die Auslegung solcher Energierückführmaßnahmen erfordert rekursive Prozessmodelle. Amortisationszeiten betragen 5 Jahre und mehr.

### Weitere Möglichkeiten zur Nutzung der Gut-Abkühlwärme

Deutlich kürzere Amortisationszeiten sind bei der Nutzung der Wärme aus der Gutkühlung zur Erwärmung von, in die Anlage integrierten, Entfettungs- oder Beizbädern zu erzielen. Diese Maßnahmen haben keinen Einfluss auf den Kernprozess.

Schließlich besteht noch die Möglichkeit Verlustwärme zur Gebäude- oder Brauchwassererwärmung zu nutzen. Dies kann aber nur eine Ergänzung zu einem bereits bestehenden Gebäudebeheizungs- bzw. Anlagenkühlsystem sein, da Heizwärme auch benötigt wird, wenn die Thermoprozessanlage steht, und dann, wenn keine oder weniger

Heizwärme angefordert wird, die Kühlwärme aus dem Prozess trotzdem abgeführt werden muss.

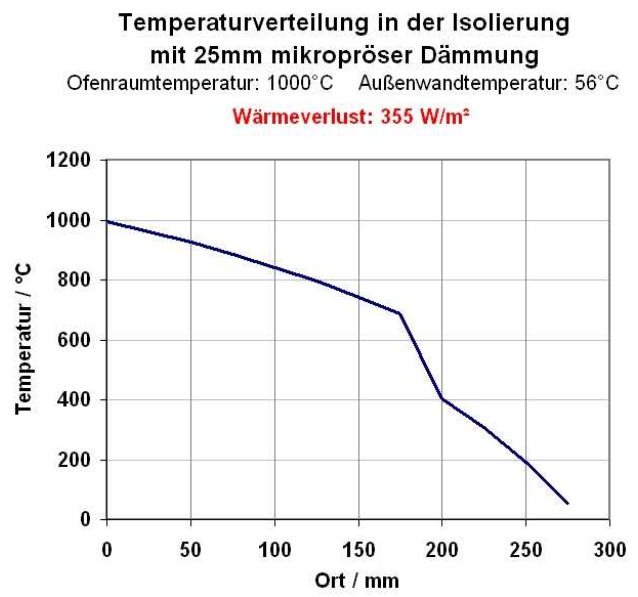
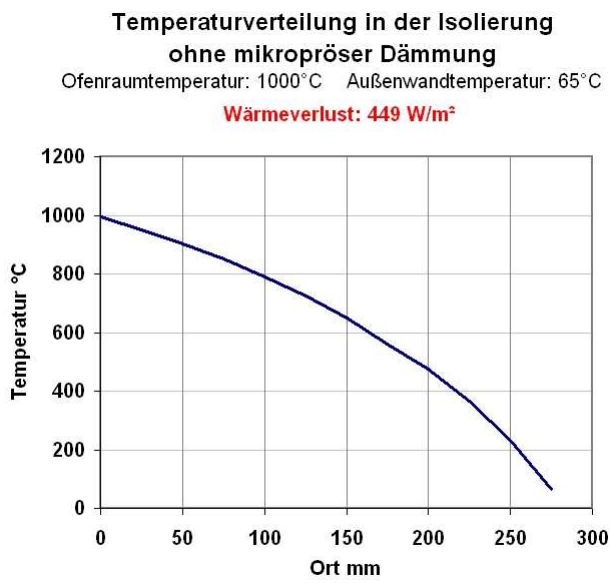
### Resümee

Bei der Erstellung eines Energieeffizienzkonzepts, sowohl für eine neue Thermoprozessanlage als auch für eine bestehende Anlage, sind daher die einfachen und rekuperativen Maßnahmen zuerst in Betracht zu ziehen. Erst wenn hier alle Möglichkeiten ausgeschöpft sind, sollte untersucht werden, ob die restliche Verlustenergie noch betriebswirtschaftlich sinnvoll in ein Heizwärmenetz eingespeist werden kann.

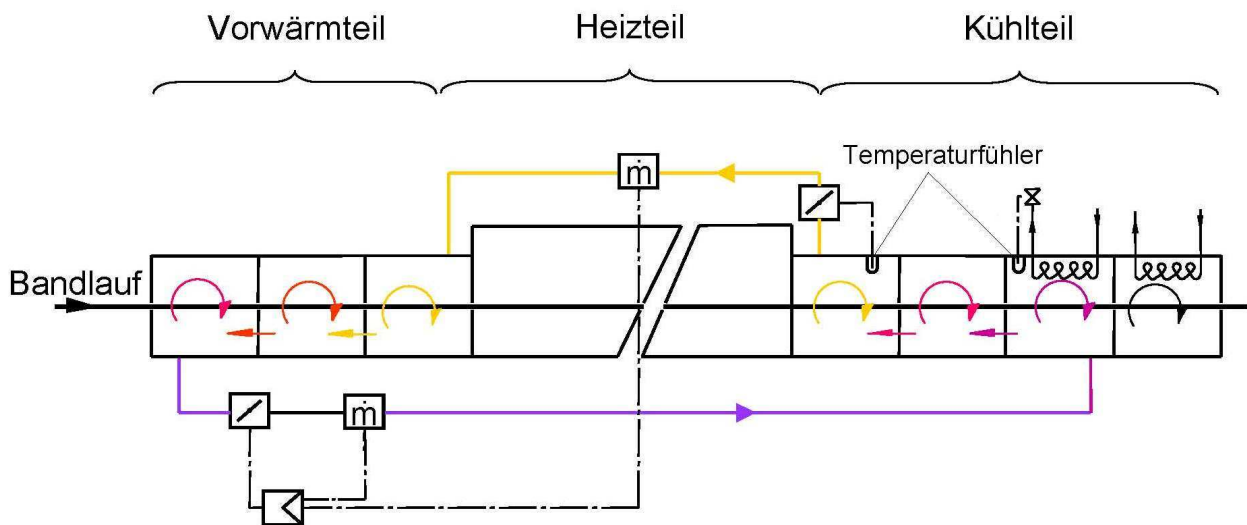
Abschließend bleibt zu bemerken, dass insbesondere die Umsetzung von rekuperativen Maßnahmen mit teils gewaltigem Energieeinsparpotential und erheblicher Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emission meist an zu langen Amortisationszeiten scheitert. Damit solche Maßnahmen häufiger umgesetzt werden und trotzdem die internationale Wettbewerbsfähigkeit gegenüber der Produktion mit weniger energieeffizienten Anlagen erhalten bleibt, sind zusätzlich staatliche finanzielle Anreize erforderlich.

### Literatur

- [1] Klatecki, Peter: Investitionsbewertung bei der Modernisierung von Thermoprozessanlagen, Gaswärme international Heft 6/2008
- [2] Berrenberg Thomas u. Carl Kramer; Energieeinsparung beim Glühen von Bandbunden aus Aluminiumlegierungen durch Kraft-Wärme-Kupplung; Gaswärme international (58), Sonderheft Energieeffizienz (2009)
- [3] Berrenberg Thomas u. Carl Kramer; Energieeinsparung bei Wärmebehandlungsanlagen; Gaswärme international (58) Heft 3/2009, 5.147—153



**Bild 1:** Gegenüberstellung eines Isolierwandaufbaus ohne und mit mikroporösem Dämmmaterial



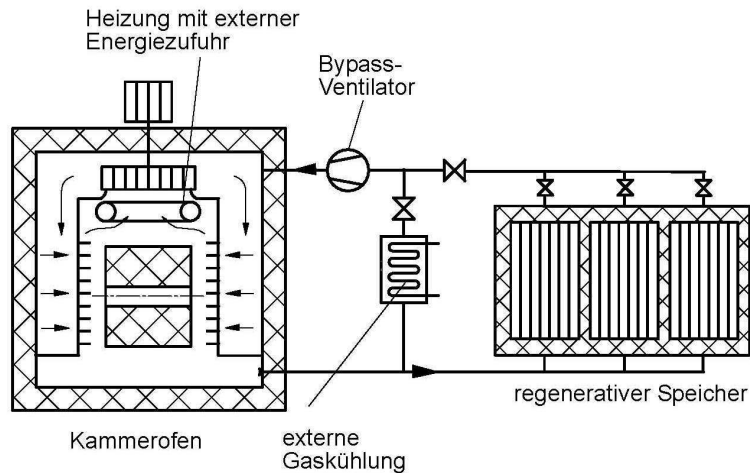
Kosten Gas :	0,05 €/kWh	<b>100 % Durchsatz</b>			<b>90% Durchsatz</b>		
Kosten Strom:	0,1 €/kWh						
CO <sub>2</sub> -Emission:	10 €/t <sub>CO2</sub>						
<b>Abkühlwärmennutzung</b>		ohne	Schutzgas Bypass	Thermoöl kreislauf	ohne	Schutzgas Bypass	Thermoöl kreislauf
<b>Glühleistung</b>	to/h	<b>19,8</b>	<b>19,8</b>	<b>19,8</b>	<b>17,7</b>	<b>17,7</b>	<b>17,7</b>
Glühtemperatur	°C	610	610	610	610	610	610

<b>Verbräuche je Tonne</b>							
Heizgasverbrauch	MJ/to	293	218	217	304	218	220
Stromverbrauch gesamt	kWh/to	18	18	15	15	15	11
<b>Energienutzung</b>							
Energierückführung	%		25,6	25,7		28,3	27,7
CO <sub>2</sub> -Produktion	kg <sub>CO2</sub> /to	16,7	12,5	12,4	17,4	12,5	12,6

CO<sub>2</sub>-Ersparnis (Beheizung) to/a 595 598 608 595

<b>Betriebsdaten jährlich (7000h)</b>							
Tonnage	to/a	138.850	138.850	138.850	123.815	123.817	123.817
Kosten Energie	€/to	4,70	4,84	4,49	5,69	4,50	4,18
Kosten CO <sub>2</sub> Emission	€/to	0,17	0,12	0,12	0,17	0,12	0,13
<b>Energiekostensparnis gesamt</b>	€/a		<b>142.963</b>	<b>191.318</b>		<b>147.509</b>	<b>187.366</b>
Energiekostensparnis	%		17,8	23,5		21,2	26,6
<b>Amortisation</b>	a		<b>5,9</b>	<b>3</b>		<b>6</b>	<b>4,7</b>

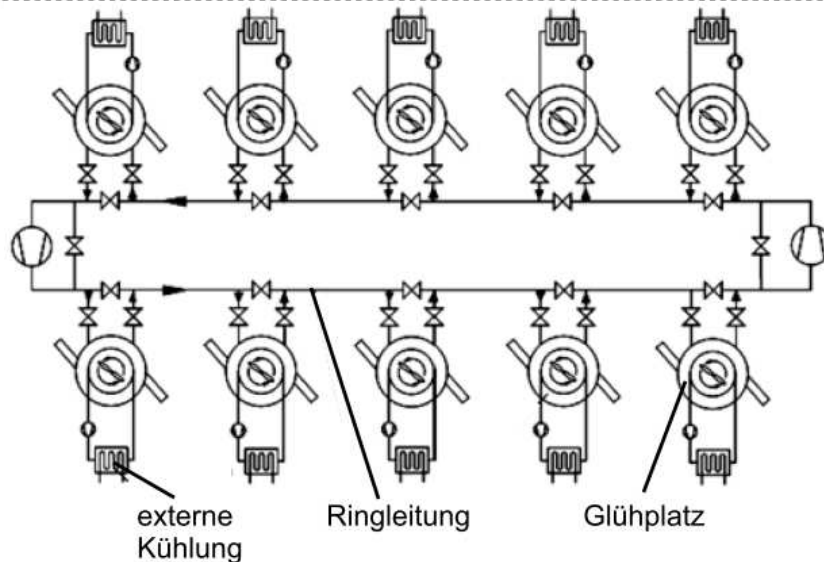
**Bild 2:** Schema der Abkühlwärmennutzung in einer Durchlauf-Wärmebehandlungsanlage für Metallbänder mittels Wärmeträgerfluid-Kreislauf zwischen Kühlteil und Vorwärmteil und **Tabelle** mit Wirtschaftlichkeitsbetrachtung



Kosten Gas : 0,05 €/kWh		100% Durchsatz		92% Durchsatz			76% Durchsatz	
Kosten Strom: 0,1 €/kWh								
CO <sub>2</sub> -Emmission: 10 €/t <sub>CO2</sub>								
Abkühlwärmennutzung		ohne	mit	mit	mit	mit	mit	mit
<b>Glühleistung</b>	t/h	<b>0,36</b>	<b>0,33</b>	<b>0,33</b>	<b>0,33</b>	<b>0,28</b>	<b>0,28</b>	<b>0,28</b>
Stapelmasse	to	15,344	15,344	15,344	15,344	15,344	15,344	15,344
Glühtemperatur	°C	580	580	580	580	580	580	580
<b>Verbräuche je Tonne</b>								
Heizgasverbrauch	MJ/to	814	652	652	652	615	615	615
Stromverbrauch gesamt	kWh/to	29	30	30	30	30	30	30
<b>Energienutzung</b>								
Energierückführung	%		23,4	23,4	23,4	29,4	29,4	29,4
CO <sub>2</sub> -Produktion	kg <sub>CO2</sub> /to <sub>1</sub>	46,6	37,3	37,3	37,3	35,2	35,2	35,2
CO <sub>2</sub> -Ersparnis	to/a		31	31	31	50	50	50
<b>Betriebsdaten jährlich (7000h)</b>								
Tonnage	to/a	2.532	2.332	2.332	2.332	1.933	1.933	1.933
<b>Energiepreissteigerung</b>				<b>x1,5</b>	<b>x3</b>		<b>x1,5</b>	<b>x3</b>
Kosten Energie (Erdgas+Strom)	€/to	14,21	12,07	18,10	36,20	11,59	17,38	34,76
Kosten CO <sub>2</sub> Emission	€/to	0,47	0,37	0,56	1,12	0,35	0,53	1,06
<b>Energiekostensparnis</b>	<b>€/a</b>		<b>5.218</b>	<b>7.827</b>	<b>15.655</b>	<b>4.277</b>	<b>6.415</b>	<b>12.830</b>
	%		14,0	21,1	42,1	14,2	21,4	42,7
<b>Amortisation</b>	<b>a</b>				<b>6,8</b>			<b>8,5</b>

**Bild 3:** Schema eines Kammerofens mit regenerativer Nutzung der Abkühlwärme des Guts zur Vorwärmung und Tabelle mit Wirtschaftlichkeitsbetrachtung





Kosten Gas :	0,05 €/kWh		<b>100%</b>	<b>90%</b>	<b>80%</b>
Kosten Strom:	0,1 €/kWh		<b>Durchsatz</b>	<b>Durchsatz</b>	<b>Durchsatz</b>
CO <sub>2</sub> -Emmission:	10 €/t <sub>CO2</sub>				
<b>Abkühlwärmennutzung</b>		<b>ohne</b>	<b>mit Kühlwärmennutzung</b>		
Anzahl Sockel		10	11	11	11
<b>Sockelleistung</b>	<b>t/h</b>	<b>2,02</b>	<b>1,83</b>	<b>1,66</b>	<b>1,48</b>
Stapelmasse	to	90,4	90,4	90,4	90,4
Glühtemperatur	°C	700	700	700	700
<b>Verbräuche je Tonne</b>					
Heizgasverbrauch	MJ/to	466	354	295	265
Stromverbrauch gesamt	kWh/to	11	13	14	14
<b>Energienutzung</b>					
Energierückführung	%		26,0	39,3	47,2
CO <sub>2</sub> -Produktion	kg <sub>CO2</sub> /to <sub>l</sub>	26,6	20,2	16,9	15,2
CO <sub>2</sub> -Ersparnis	to/a		919	1.610	2.046
<b>Betriebsdaten jährlich (7000h)</b>					
Tonnage	to/a	141.501	140.778	127.938	113.653
Kosten Energie (Erdgas+Strom)	€/to	7,57	6,24	5,45	5,06
Kosten CO <sub>2</sub> Emission	€/to	0,27	0,20	0,17	0,15
<b>Energiekostensparnis</b>	<b>€/a</b>		<b>196.212</b>	<b>284.341</b>	<b>298.286</b>
	%		17,8	28,4	33,5
<b>Amortisation</b>	<b>a</b>		<b>6</b>	<b>3,5</b>	<b>3</b>

**Bild 4:** Schema einer Haubenofenanlage mit Nutzung der Gut-Abkühlwärme durch Rauchgasaustausch zwischen den Heizhauben und Tabelle mit Wirtschaftlichkeitsbetrachtung