

6  
2008

# **GASWÄRME** **International**

**Gasanwendung in Industrie und Gewerbe**

<http://www.gaswaerme-online.de>

**Schwerpunkt**  
**Thermoprosesstechnik**

## Energieeinsparung beim Glühen von Bandbunden aus Aluminium-Legierungen durch Kraft-Wärme-Kopplung

Energy savings at the annealing of aluminium alloy strip coils by combined  
heat and power generation

Dr.-Ing. Thomas Berrenberg, ITP Institut für Thermoprosesstechnik GmbH, Aachen  
Prof. Dr.-Ing. Carl Kramer, WSP GmbH, Aachen

erschieden in

**GASWÄRME International 6/2008**

Vulkan-Verlag GmbH, Essen

Ansprechpartner: Stephan Schalm, Telefon 0201/82002-12, E-Mail: [s.schalm@vulkan-verlag.de](mailto:s.schalm@vulkan-verlag.de)

# Energieeinsparung beim Glühen von Bandbunden aus Aluminium-Legierungen durch Kraft-Wärme-Kopplung

Energy savings at the annealing of aluminium alloy strip coils by combined heat and power generation

Von Thomas Berrenberg, Carl Kramer

Für das Glühen von Bandbunden aus Aluminiumlegierungen wird die Anwendung einer Kraft-Wärme-Kopplung mit durch Erdgas betriebener Kleingasturbine untersucht. Eine Beispielberechnung für einen Rollenherdofen, durch den die Coils im Gegenstrom zu dem in Heizrohren geführten Turbinenabgasstrom unter Schutzgas erwärmt und anschließend ebenfalls unter Schutzgas abgekühlt werden, zeigt mögliche Einsparung bei Energieverbrauch und Energiekosten sowie beim CO<sub>2</sub>-Ausstoß auf.

For the annealing of aluminium alloy strip coils the application of combined heat and power generation by a natural gas fired micro-turbine is investigated. An example calculation for a roller hearth furnace in which the coils are heated under protective gas in counter flow by the gas turbine exhaust gas conducted in heating pipes and afterwards cooled under protective gas, too, shows possible savings as well in energy consumptions and energy costs as in CO<sub>2</sub>-emission.

Die Glühung von Bandbunden aus Aluminiumlegierungen, die in der Regel in Kammeröfen erfolgt, ist wegen der hohen spezifischen Wärmekapazität dieser Werkstoffe von ca. 1 kJ/(kg K) äußerst energieaufwändig. Meist handelt es sich um Weichglühen von Bändern aus Legierungen 3xxx, 4xxx und 5xxx nach dem Kaltwalzen. Dazu müssen Materialtemperaturen von 360 bis 450 °C erreicht werden. Nur in Fällen wo ein Homogenisieren von Gussgefügen bei Caster-Bändern erforderlich ist, betragen die Glühtemperaturen bis zu 580 °C.

Da sich Aluminiumhalbzeuge nur schlecht durch Strahlung erwärmen lassen, erfolgt die Glühung der Bandbunde in Konvektionskammeröfen, in denen die Gasatmosphäre mit leistungsstarken Ventilatoren umgewälzt und bei moderneren Öfen mit speziellen Düsensystemen auf die Coilstirnflächen aufgeblasen wird. Die zum Betrieb der Ventilato-

ren erforderliche Energie macht ein Viertel bis ein Drittel der insgesamt zugeführten Energie aus. Die restlichen Anteile von drei Vierteln bis zwei Dritteln werden in der Regel durch Gasfeuerung zugeführt, wobei noch der feuerungstechnische Wirkungsgrad zu berücksichtigen ist. Die Erwärmung findet also – wie generell bei Hochkonvektionsanlagen – zu einem nicht unwesentlichen Teil mit der teuren Sekundärenergie „Strom“ über Ventilatoren „mechanisch-elektrisch“ statt.

Die Beheizung der Kammeröfen erfolgt indirekt durch gasbefeuerte Strahlheizrohre oder in Ausnahmefällen direkt elektrisch, da der Kontakt einer Rauchgasatmosphäre mit der Bandoberfläche aus Gründen der Oberflächenqualität bei Materialtemperaturen über ca. 150 °C nicht zulässig ist. Oberhalb dieser Temperatur soll der Sauerstoffgehalt in der Ofenatmosphäre weniger als 0,1 Vol % betragen. Als Schutzgas wird da-

her Stickstoff mit einem geringen Wasserstoffanteil von 2 bis 3 Vol % verwendet.

Besondere Maßnahmen erfordert die Austragung des dem Coil noch anhaftenden Walzschmiermittels. Die Walzöle verdampfen bis zu einer Temperatur von ca. 150 °C. Solange noch Walzöl im Coil enthalten ist, darf die Materialtemperatur nicht wesentlich über diese Temperatur gesteigert werden, um Fleckenbildung auf dem Band durch vercracktes Walzöl zu vermeiden. Darum wird in dieser Anfangsphase der Glühung eine Spülung der Ofenkammer mit ca. 7 Volumenwechseln durchgeführt, für die aus Kostengründen Stickstoff ohne Wasserstoffbeimengung verwendet wird. Durch diese Spülung mit Stickstoff wird außerdem die Entstehung eines explosiven Walzöldampf-Sauerstoffgemisches verhindert.

Der starke Anstieg der Energiekosten in jüngster Vergangenheit, insbesondere bei Strom, der sich in der Zukunft noch fortsetzen und verstärken wird, wie alle Prognosen zeigen, legt es nahe, über einfache und in der Produktionspraxis umsetzbare Möglichkeiten der Energieeinsparung nachzudenken. Dies scheint, wie im Folgenden beschrieben wird, durch Kraft-Wärme-Kopplung mit einem Klein-Gasturbinen-Generator-Aggregat möglich.

## Energieersparnis durch Kraft-Wärme-Kopplung

Da die maximal erforderliche Materialtemperatur beim Glühen von Leichtmetallcoils in den meisten Anwendungsfäl-

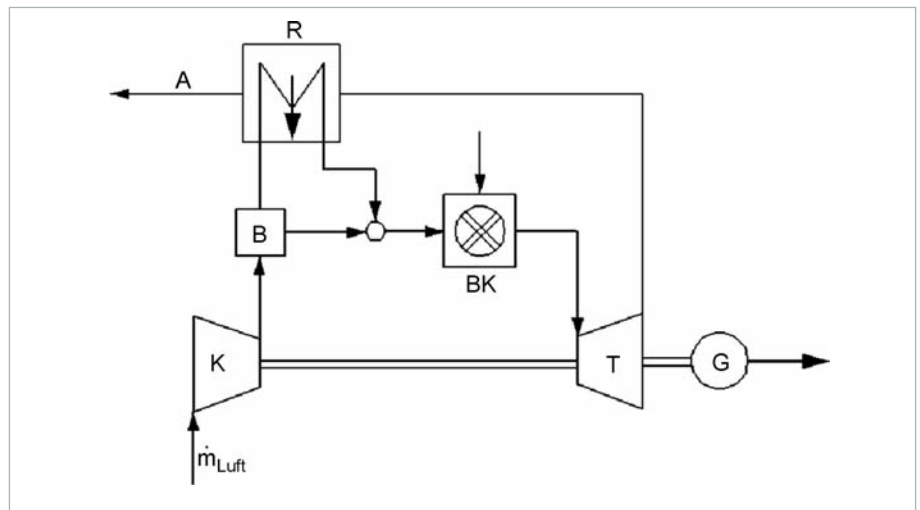
len ca. 450 °C beträgt, ist die Durchführung des Glühprozesses mit einer Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) möglich. Dabei treibt eine mit Erdgas betriebene Gasturbine einen Generator an. Für die vorliegende Anwendung kommt eine Kleingasturbinen-Anlage in Frage, die ausreichend elektrische Leistung für den Ventilatorbetrieb liefert. Bei nicht zu hohem Druckverhältnis und ohne Abgaswärmerecuperation vor der Brennkammer sind bei elektrischen Wirkungsgraden von 15 bis 20 % Abgastemperaturen der Gasturbine bis zu 650 °C möglich. Günstig sind Anlagen, bei denen eine variable Einstellung des Rekuperationsgrades mittels eines Abgasbypass und damit eine Veränderung der Abgastemperatur und des elektrischen Wirkungsgrades möglich ist, z. B. mit Rekuperation Abgastemperatur ca. 300 °C und  $\eta_{\text{elek.}} \approx 22\%$  oder ohne Rekuperation Abgastemperatur 650 °C und  $\eta_{\text{elek.}} \approx 15\%$ . Ein Schema eines solchen Aggregates ist in **Bild 1** dargestellt.

Für das im Folgenden beschriebene Beispiel wird ein solches fiktives Kleingasturbinenaggregat angenommen, dessen Gasturbinenabgas die für die Gluhanlage notwendige Prozesswärme durch einen Abgasstrom mit 625 °C bereitstellt.

Mit dem Abgasstrom der Gasturbine werden die Coils indirekt erwärmt. Dazu wird das Gasturbinenabgas durch in den Ofen eingebaute, Strahlheizrohren ähnliche, Heizrohrregister geleitet. Genauso wie beim konventionellen Kammerofen ist die Beheizung indirekt, und ein Kontakt des Verbrennungsgases mit der Bandoberfläche ist ausgeschlossen. Der vom Generator erzeugte Strom dient zum Betrieb der Ventilatormotoren oder wird zu wirtschaftlich vorteilhaften Bedingungen in das E-Netz eingespeist. Falls die elektrische Leistung des Gasturbinenaggregates nicht ausreicht, wird der Fehlbedarf dem E-Netz entnommen.

Die Erwärmung der Coils mit dem Abgasstrom der Gasturbine erfolgt zweckmäßig in einem im Takt arbeitenden Durchlauf-Rollenherdofen im Kreuz-Gegenstrom, wie in **Bild 2** schematisch dargestellt. Die Coils werden mit möglichst leichten Glühgestellen durch die Anlage gefahren.

Die skizzierte Rollenherdanlage besteht einschließlich Walzölabdampfung und Kühlung auf Handlingtemperatur aus 7 Kammern die jeweils 1 Coil aufnehmen.



**Bild 1:** Schema einer Klein-Turbinen-Anlage mit variabler Abgasrekuperation (A = Abgasstrom, R = Rekuperator, BK = Brennkammer, V = Verdichter, T = Turbine, G = Generator, B = variabler Bypass,  $\dot{m}_{\text{Luft}}$  = Ansaugluft)

**Fig. 1:** Schematic of a micro turbine aggregate with variable exhaust gas recuperation (A = exhaust gas flow, R = recuperator, BK = combustion chamber, V = compressor, T = turbine, G = generator, B = variable bypass,  $\dot{m}_{\text{Luft}}$  = intake air flow)

Angenommen wird ein 10 to Coil mit

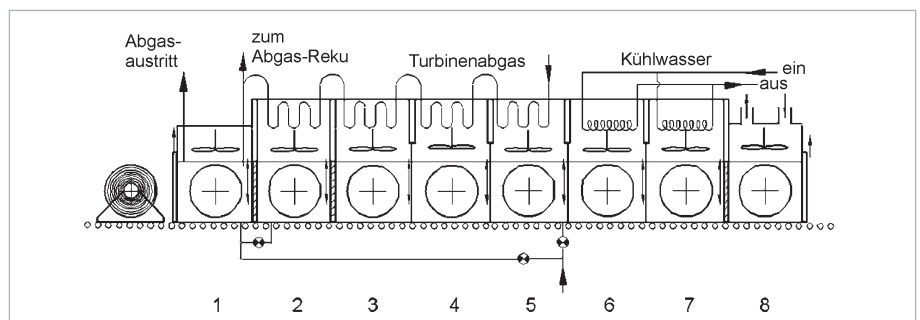
Coilbreite	1750 mm
Coilaußendurchmesser	1750 mm
Coilinnendurchmesser	600 mm
Coilmasse	10.289 kg
mittlere spez. Wärmekap.	900 J/(kgK)
mittlere Wärmeleitfähigkeit	170 W/(mK)

Eine für diese Coil-Daten berechnete Glüh- und Abkühlkurven zeigt **Bild 3**. Für die Berechnung wurde ein spezielles Rechenmodell entwickelt.

In der Heizkammer 2 mit der niedrigsten Temperatur und Heizkammer 5, mit der höchsten Temperatur wird das Coil im Gegenstrom zum Turbinenabgas auf ca. 440 °C erwärmt. Heizkammer 2 dient zugleich als Schutzgasschleuse und ist

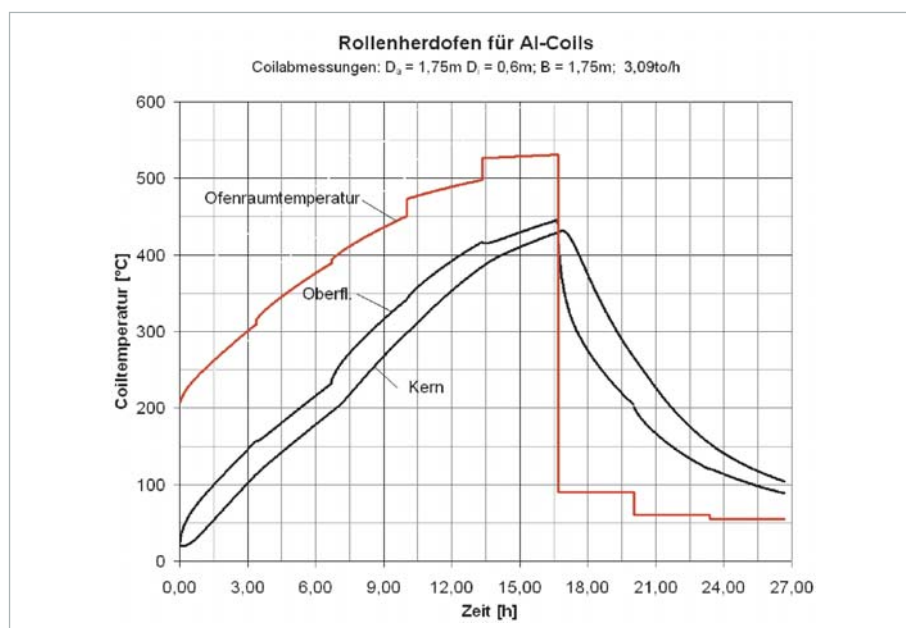
am Eintritt und Austritt mit entsprechend gasdicht schließenden Hubtüren ausgestattet.

Kammer 1 ist die Hauptentlückungskammer. Da die Coiltemperatur max. 150 °C erreicht, wird diese Kammer direkt mit einem Teilstrom des Turbinenabgasstroms beheizt, der insgesamt ca. 1 Nm<sup>3</sup>/s beträgt. Der andere Teil des Abgasstroms wird in den Reku der KWK-Anlagen geleitet und durch die Verbrennungsluftvorwärmung auf eine Austrittstemperatur von ca. 270 °C abgekühlt. In der Entlückungskammer 1 bewirkt der Abgas-Teilstrom bei einem Kammervolumen von ca. 20 m<sup>3</sup> ca. alle 30 s einen Volumenwechsel, wodurch der Walzöldampf völlig gefahrlos ausgetragen werden kann. Zusätzlich wird noch das Schutzgas zum Spülen von Kammer 2



**Bild 2:** Schema einer Rollenherd-Ofenanlage zum Glühen von Coils aus Aluminiumlegierungen mit Beheizung aus Kraft-Wärme-Kopplung

**Fig. 2:** Schematic of a roller hearth furnace plant for the annealing of aluminium alloy strip coils and heating by combined heat and power generation



**Bild 3:** Glüh- und Abkühlkurven für die Anlage nach Bild 2  
**Fig. 3:** Annealing and cooling curve for a plant according to Figure 2

vor dem Öffnen der Schleusentür zu Kammer 3 in Kammer 1 geleitet und gemeinsam mit dem Abgas abgeführt. Aus dem aus Kammer 1 abgeführten Gasstrom wird der Walzöldampf entfernt bevor das Abgas in den Kamin eingeleitet wird.

Es darf angenommen werden, dass die Verbrennungsluftvorwärmung den elektrischen Wirkungsgrad auf 20 bis 22 % erhöht. Es wird mit 20 % gerechnet.

Die Kammern 6 und 7 dienen als Kühlzonen und sind mit Schutzgas/Wasserkühlern ausgestattet. Mit der für Luftkontakt unkritischen Temperatur kleiner 150 °C gelangt das Coil in die Schleusenkammer 8 wo eine weitere Konvektionskühlung nach Teilöffnung der Schleusenaustrittstür mit Umgebungsluft stattfindet.

Durch die Kammern werden die Coils mit einem Chargengestell im Takt hindurchgefördert. In die fünfte Kammer tritt der Abgasstrom, geführt in Heizrohren, mit ca. 600 °C ein und aus der zweiten Kammer nach Wärmeabgabe an die Coils mit einer Temperatur von ca. 300 °C wieder aus. Das Abgas strömt also im Gegenstrom zu den Coils. Der Wärmeaustausch mit den Coils erfolgt in den Kammern durch Hochkonvektion im Kreuzstrom. Die Coiltemperatur wird in üblicher Weise durch Kontakt- oder Stechthermoelemente überwacht. Zur Temperaturregelung wird die Ventilator-drehzahl und damit der Wärmeüber-

gang auf das Coil entsprechend verändert.

Die Temperatur des Abgasstroms aus Kammer 1 ist mit ca. 200 °C noch so hoch, dass Walzöldampf noch nicht kondensiert. Um das Walzöl aus dem Abgas auszuschneiden, durchströmt es einen Kühler mit nachgeschalteter Abscheideeinrichtung, so dass der Abgasstrom vom Walzöldampf befreit wird. Der Küh-

ler zur Öldampfkondensation kann noch zur Brauch- und Heizwassererwärmung genutzt werden (in der Energiebilanz nicht berücksichtigt).

Zwischen den Kammern, die nicht als Schleusen dienen, befinden sich einfache, pneumatisch betätigte Blechschieber, die eine Vermischung der in den Kammern im Kreuzstrom bewegten Gasströme in ausreichendem Maße verhindern. Der Abgasstrom wird vom Abzugventilator durch die Leckagen dieser Trennschieber gezogen.

Nur die Kammern 3, 4 und 5 erfordern entsprechend hitzebeständiges Material. Alle anderen Kammern können unbedenklich aus Normalstahl gefertigt und mit üblichen Hochleistungsventilatorrädern ausgestattet werden, was erheblich zur Kosteneinsparung beiträgt.

In **Tabelle 1** wird der Energieverbrauch für die Coilglühung im konventionellen Ofen – bezogen auf 1 Coil mit den aufgeführten Abmessungen – mit dem Energieverbrauch im Rollenherdofen mit KWK verglichen. Die Daten erheben nicht den Genauigkeitsanspruch von Projektdaten, sind aber für einen ersten Vergleich ausreichend.

Für die Stromkosten wurde 100 €/MWh und für die Gaskosten 50 €/MWh angenommen sowie für den CO<sub>2</sub>-Ausstoß 0,175 kg CO<sub>2</sub>/kWh-Gas und 0,437 kg CO<sub>2</sub>/kWh-Strom.

**Tabelle 1:** Energiebedarf zum Glühen eines Coils der Breite 1750 mm und der Masse 10289 kg auf 450 °C in einem Rollenherdofen mit KWK und einem Kammerofen (konventionell)

**Table 1:** Comparison of the energy consumption for the annealing of a coil width 1,750 mm and mass 10,289 kg to 450 °C in a roller hearth furnace with combined heat and power generation and in a conventional chamber furnace

Rollenherdofen mit KWK		Kammerofen	
Gutwärme	1033 kWh	Gutwärme	1033 kWh
Isolationsverluste	82 kWh	Isolationsverluste	140 kWh*
Energie für Ventilatoren beim Heizen	170 kWh	beim Heizen	170 kWh
beim Kühlen	340 kWh	beim Kühlen	450 kWh**
Heizwärme aus Turbinengas	945 kWh	Heizwärme aus Gasfeuerung	103 kWh
Abgasverlust	683 kWh	Abgasverlust	267 kWh**
Gasenergiebedarf	2035 kWh	Gasenergiebedarf	1269 kWh**
E-Energie aus Netz	103 kWh	E-Energie aus Netz	630 kWh
E-Energie aus KWK	407 kWh		
Gaskosten	101,75 €	Gaskosten	63,50 €
Stromkosten	10,30 €	Stromkosten	63,00 €
Gesamtkosten	112,05 €	Gesamtkosten	126,50 €

\*) Die Außenwandtemperatur im Brennereich ist höher

\*\*) Die Bypasskühlung erfordert zusätzliche Ventilatorleistung

Bei 5000 Betriebsstunden/Jahr und einem Durchsatz von 1500 10 to-Coils entsprechen einer Taktzeit der Durchlauf-Rollenherdanlage 3,3 h beträgt mit diesen Annahmen die Energiekostensparnis pro Jahr ca. 22 000 €.

Der CO<sub>2</sub>-Ausstoß verringert sich um knapp 150 to/Jahr.

## Ausblick

Die Ersparnis an Kosten und CO<sub>2</sub>-Produktion ist deutlich. Dagegen stehen die höheren Investitions- und Wartungskosten. Besonders letztere lassen sich schwer einschätzen, da noch keine großen Erfahrungen mit vergleichbaren KWK-Anwendungen vorliegen. Den Investitionskosten für die KWK-Anlage stehen die Kosten der Gasfeuerungsanlage – ohne Strahlheizrohrkosten – von ca. 200 €/kW gegenüber. Die Kosten für die Strahlheizrohre im konventionellen Ofen dürften sich trotz der kleineren erforderlichen Oberfläche wegen des

höher temperaturbelasteten teuren Materials mit den Kosten für die Abgasheizrohre die Waage halten.

Ein Vorteil der KWK Technik ist, dass je kWh eine Einspeisevergütung gezahlt wird, die wesentlich höher ist als die Kosten für die Leistungsentnahme aus dem Netz. Außerdem erhalten Betreiber von KWK-Anlagen steuerliche Vergünstigungen.

Bei einer genaueren Projektierung wäre noch zu berücksichtigen, dass beim konventionellen Kammerofen der auf Glüh-temperatur befindliche Ofen bei jeder Charge mit abgekühlt wird, weil die Abkühlung in der Ofenkammer stattfindet, der Heizteil der Rollenherdanlagen aber immer auf Temperatur bleibt. Außerdem wird das Coil tiefer abgekühlt, während die Charge bei konventionellen Kammeröfen noch auf einem Kühlplatz steht, um von ca. 150 °C weiter abzukühlen.

Wenn auch der Kostenvorteil einer KWK-Anlage bei der Coilglühung insge-

samt noch klein erscheint, so dürfte doch die Zeit, angesichts weiter steigender Energiepreise, dafür reif sein, die möglichen Vorteile an Hand konkreter Projekte genauer zu untersuchen. ■

**Dr.-Ing. Thomas Berrenberg**  
ITP Institut für Thermoprozesstechnik GmbH, Aachen

Tel. 02 41/87 97 03 78  
E-Mail:  
berrenberg@itp-aachen.de



**Prof. Dr.-Ing. Carl Kramer**  
WSP GmbH, Aachen

Tel. 02 41/87 97 03 12  
E-Mail:  
info@wsp-aachen.de

