

Nachnutzung von Prozessabwärme am Beispiel eines rekuperativen Transportsystems

(Re-use of process waste heat – the example of a recuperative transportation system)

Böhme, J.¹; Patzig, L.¹; Todtermuschke, M.¹

¹ Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU)

Abstract

Mit Hilfe von Methoden wie z. B. der Substitution von Prozessen, der Rekuperation von Prozessenergie oder der Elimination unnötiger Prozessschritte kann der Energieumsatz innerhalb einer Prozesskette reduziert werden. In diesem Artikel soll die Methode der Rekuperation von Prozessabwärme exemplarisch auf einen Schmiedeprozess angewendet werden. Die Bauteilabwärme, welche beim Abkühlvorgang nach dem Schmiedeprozess freigesetzt wird, kann für weitere Prozesse, bspw. für die Bauteilerwärmung, nachgenutzt werden. Dieser Vorgang soll innerhalb der Prozessschrittverkettung durch die Verwendung eines rekuperativen Transportsystems realisiert werden.

The overall energy consumption of a process chain can be reduced by several methods such as the substitution of processes, the recuperation of process energy or the elimination of unnecessary process steps. In this article, the method of the recuperation of process waste heat is applied exemplarily to a forging process chain. The component waste heat which is released during the cooling process after forging can be re-used for further processes, here, for the preheating of components. The paper describes a recuperative transportation system as a technical solution for the re-use of waste heat within the given forging process chain.

Keywords:

Nachnutzung von Prozessabwärme, Transportsystem, Schmieden
re-use of waste heat, transportation system, forging

R. Neugebauer, U. Götze, W.-G. Drossel (Hrsg.), *Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung und Bewertung technischer Systeme – Erkenntnisse aus dem Spitzentechnologiecluster eniPROD*, Tagungsband zum 1. und 2. Methodenworkshop der Querschnittsarbeitsgruppe 1 "Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung" des Spitzentechnologieclusters eniPROD, *Wissenschaftliche Scripten*, Auerbach, 2013.
URN: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-109067>

1 Einleitung

Produktionsanlagen zur Herstellung von Halbzeugen, wie z. B. Gießereien, Schmieden und Walzwerke, realisieren die jeweils entstehenden Halbzeuge überwiegend mit energieintensiven Formgebungsprozessen. Energieeffizienz kann hierbei vor allem durch Nachnutzung von „Verlustenergien“ erreicht werden. Die in solchen Produktionsanlagen wesentliche Energieform ist die thermische Energie. Entscheidend ist hierbei, ob eine ausreichend Energiedichte für eine Nachnutzung vorliegt. Ist beispielsweise der Temperaturgradient zwischen Abwärme und der erforderlichen Temperatur des Nachnutzungsprozesses zu gering, ist eine wirtschaftliche Realisierung der Rekuperation nicht möglich, vor allem auch unter Berücksichtigung der Tatsache, dass stets weitere Verluste bei der Energieübertragung der nachgenutzten Wärmeenergie zu erwarten sind. Des Weiteren ist bei der Nutzung von Abwärme die räumliche Nähe von Wärmequelle und Wärmesenke unabdingbar, da die Verluste beim Wärmetransport mit zunehmender Entfernung stark ansteigen.

Insbesondere beim Gießen und Schmieden entsteht während der Abkühlung der Bauteile viel Abwärme, welche bislang meist ungenutzt an die Umgebung freigesetzt wird.

Die Nachnutzung dieser Prozessabwärme wird mit dem derzeitigen Stand der Technik industriell nur unzureichend umgesetzt. Mit Hilfe von rekuperativen Systemen, wie z. B. Wärmetauschern [1, 2], besteht die Möglichkeit die Prozessabwärme zurückzuführen. In der Produktionsplanung findet dieser Sachverhalt im Gegensatz zur Fabrikplanung (Nachnutzung für Heizung/Klimatechnik) aber wenig Beachtung [3]. In der Verfahrenstechnik wird zur Optimierung von Prozessen und Anlagen die von Linnhoff entwickelte PINCH-Analyse eingesetzt [4]. Diese Methode wird zur systematischen Analyse des Energieumsatzes (bei Anlagensystemen) eingesetzt. Dabei werden thermodynamisch minimale Energieumsätze berechnet, jedoch steht die Rekuperation von Prozessabwärme hier nicht im Focus [5]. Ziel ist es daher, eine Produktionsanlage systematisch zu analysieren, um Potenziale für die Nachnutzung von Energien zu identifizieren, wobei besonderer Fokus auf die thermische Energie (z. B. Abwärme) gelegt wird.

Um gezielt die Bauteilabwärme nutzen zu können, müssen verschiedene thermodynamische Prinzipien, wie freie und erzwungene Konvektion sowie die Wärmestrahlung systematisch analysiert werden (siehe Kapitel 2). Das Ziel besteht darin, diese Prinzipien bzw. deren Kombination für eine technische Umsetzung methodisch zu eruieren sowie die unterschiedlichen Energieumsätze zu berechnen. Anhand eines Variantenvergleichs werden in Kapitel 3 die einzelnen Konzepte gegenübergestellt und bewertet.

2 Prozesskettenanalyse

2.1 Grobanalyse

Da sich nicht jede Prozesskette gleichermaßen für Rekuperationen eignet, wird ein schrittweises Vorgehen vorgeschlagen. Zunächst werden alle globalen Informationen über den Fertigungsablauf gesammelt und systematisch aufgearbeitet. Wichtig für eine erste Einschätzung sind Daten über die Produktionsart und den Ablauf der Produktion. Ein kontinuierlicher Produktionsablauf innerhalb einer festen Fließfertigung bietet wesentlich mehr Ansatzpunkte als eine diskontinuierliche Nestfertigung. Nach einer ersten Einschätzung des Produktionssystems erfolgt eine Grobanalyse aller vorhandenen Prozessketten innerhalb einer Produktionsanlage zur Identifikation energetischer Einsparpotenziale.

Zunächst werden die einzelnen Prozesse innerhalb der Prozesskette systematisch analysiert. Am Beispiel der Fertigung einer segmentierten Welle aus geschmiedeten Halbzeugen wird in diesem Artikel exemplarisch ein Prozesskettenausschnitt näher betrachtet. Dafür werden vorrangig die energetischen Prozess-In- und Outputgrößen, wie z. B. die elektrische und thermische Energie, systematisch erfasst und anschließend bewertet. Nachdem die Ermittlung und Bewertung aller energieintensiven Prozesse innerhalb der Prozesskette abgeschlossen ist, folgt eine Analyse möglicher Prozesskopplungen, wie z. B. die Nachnutzung der Abwärme vom Schmiedeprozess für eine Wärmebehandlung der Bauteile beim Fügen innerhalb der Prozesskette (siehe Bild 1).

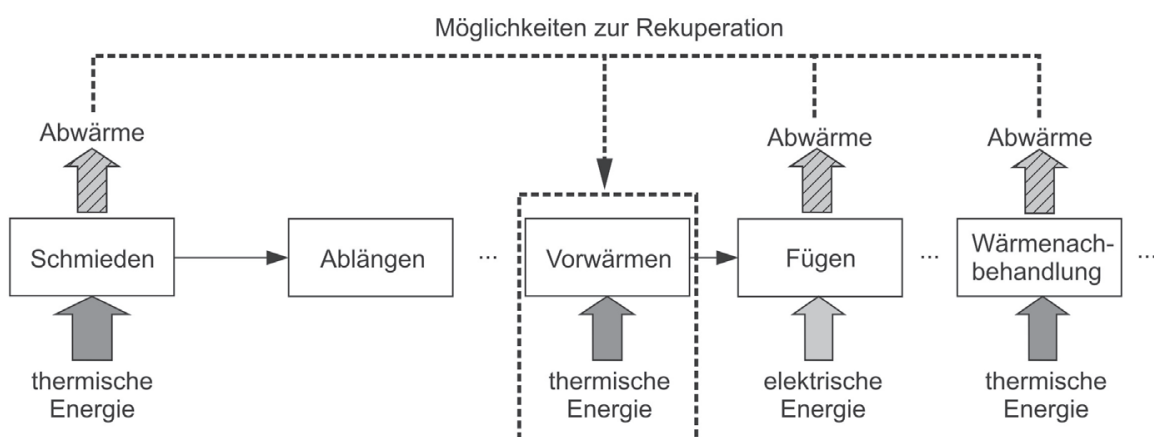


Bild 1: Ausschnitt einer Prozesskette zur Herstellung einer segmentierten Welle aus geschmiedeten Halbzeugen - Analyse relevanter Energieumsätze

Als zusätzliche Randbedingung muss die räumliche Lage der ausgewählten Fertigungsprozesse berücksichtigt werden. Hier erfolgt eine Klassifizierung der Fertigung der Bauteile welche:

- innerhalb einer Fabrikhalle,
- in einer benachbarten Fabrikhalle oder
- als Zulieferung von externen Werken

erfolgt.

Die oben beschriebene Herangehensweise wird in diesem Artikel als *Grobanalyse der Prozesskette* bezeichnet und richtet sich nach folgendem Ablauf (siehe Bild 2):

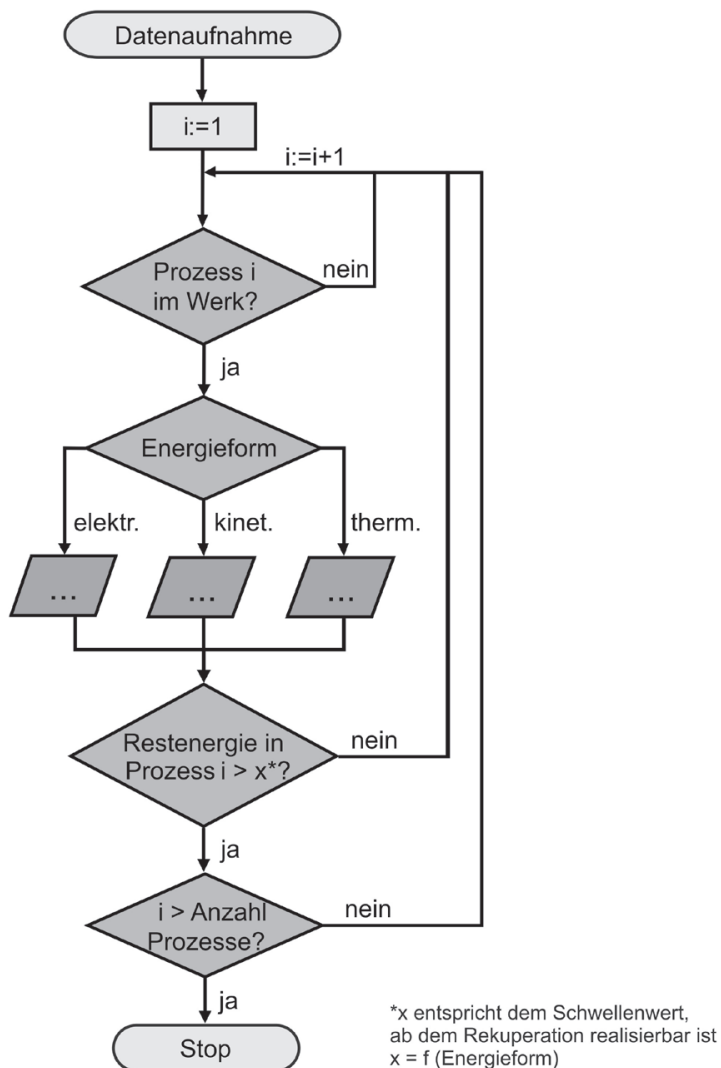


Bild 2: Ablaufdiagramm zur Grobanalyse

2.2 Feinanalyse

Nachdem in der Grobanalyse geeignete Prozesse identifiziert wurden, werden in einem weiteren Schritt die nutzbaren Energieformen, wie z. B. die Prozessabwär-

me, nach der Energieform gegliedert und die Energiemenge pro Prozess berechnet.

Bei der Feinanalyse werden für die einzelnen Prozesse mit Hilfe eines Fragenkataloges verschiedene Kriterien abgefragt, was nachfolgend am Beispiel der thermischen Energie erläutert wird:

- Wo und mit welcher Energiedichte tritt die Abwärme auf (Maschine, Prozess, Bauteil, Ofen, Leitungen)?
- Wie viel Energie aus dem Spenderprozess, d. h. dem Prozess mit überschüssiger Restenergie, z. B. Abwärme, steht für den potentiellen Empfängerprozess zur Verfügung?
- Welcher Prozess kommt als Empfängerprozess in Frage? (Beurteilung der notwendigen Wärmemengen, Zieltemperaturen etc.)
- Welche Temperaturdifferenz besteht zwischen Spenderprozess und dem potentiellen Empfängerprozess?
- Wie viel Energie ist für die Wärmeübertragung notwendig (z. B. für Ventilatoren, Gebläse etc.)
- Wie viel Energie benötigt der potentielle Empfängerprozess in der aktuellen Prozesskette?
- Ist eine räumliche Nähe der zu verknüpfenden Prozesse im Fertigungsablauf aus technologischer sowie konstruktiver Sicht realisierbar (Logistik, Wärmetransportverluste)?

Alle Fragen sind jeweils unter Berücksichtigung der unabdingbaren Prozessparameter wie Taktzeiten, Einhaltung bestimmter Produktionsabläufe etc. zu beurteilen. Nachdem die Grob- und Feinanalyse abgeschlossen wurde, kann anhand der ausgewählten Prozesse ein System für die Nachnutzung der Energie entwickelt und bewertet werden.

2.3 Beispiel Schmiedeteil

An dieser Stelle soll die im Abschnitt 2.2 vorgestellte Methode auf ein Beispiel angewendet werden. Für die exemplarische Betrachtung wurde stark vereinfacht ein zylindrisches Bauteil (42CrMo4) mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Masse von 3 kg angenommen. Ferner wurde für die Berechnung die geometrische Formänderung des Bauteils durch den Schmiedeprozess nicht mit berücksichtigt. Mit Hilfe der Grobanalyse erfolgte anhand der ausgewählten Prozesskette (siehe Bild 1) die Auswahl von zwei hochenergetischen Prozessen: Schmieden und Vorwärmen. Für das Schmiedeteil wurde eine Ausgangstemperatur von 900°C festgelegt. Um den Vorwärmprozess für den Schweißprozess zu realisieren, wird eine Temperatur von 450°C benötigt.

2.3.1 Feinanalyse

1. Frage: Wo und mit welcher Energiedichte tritt die Abwärme (Maschine, Prozess, Bauteil, Ofen, Leitungen) auf?

Die nutzbare thermische Energie ist in den heißen Schmiedeteilen gespeichert und wird derzeit beim Abkühlprozess an die Umgebung abgegeben. Die Erwärmung des Schmiedewerkzeuges und der Maschine wird in der nachfolgenden Betrachtung nicht berücksichtigt.

2. Frage: Wie viel Energie aus dem Spenderprozess steht für den potentiellen Empfängerprozess zur Verfügung? (Abschätzung)

Bei einer Bauteilmasse des Zylinders von 3 kg und einer Umgebungstemperatur von 20°C beträgt der Energiegehalt 420 Wh (Exergieanteil). Bei einer angenommenen Losgröße von 100 Stück pro Stunde ergibt sich eine Summe von 42 kWh, welche theoretisch für eine Nachnutzung zur Verfügung steht. Aufgrund des Temperaturprofils sind jedoch nur ca. zwei Drittel der Wärmemenge nutzbar, hier 28 kWh.

3. Frage: Welcher Prozess kommt als Empfängerprozess in Frage?

Um Umwandlungsverluste zu vermeiden, weist der geeignete Empfängerprozess die gleiche Energieform wie der Spenderprozess auf. Zum Beispiel wird für das Vorwärmen der Bauteile für einen anschließenden Fügeprozess thermische Energie benötigt, um die Bauteile von 20°C auf 450°C vorzuwärmen. Die dafür notwendige zuzuführende Wärmemenge beträgt 21,4 kWh. Im Verhältnis liegt damit die benötigte Energie des Empfängerprozesses bei ca. 50% der theoretisch nutzbaren thermischen Energie aus dem Spenderprozess. Dies entspricht ca. 75% des nutzbaren Anteils.

4. Frage: Welche Temperaturdifferenzen treten in der Fertigung zwischen dem Spenderprozess und dem potentiellen Empfängerprozess auf?

Die Schmiedeteile kommen mit einer Temperatur von 900°C aus dem Prozess. Die zu erwärmenden Bauteile sollen von 20°C Umgebungstemperatur auf 450°C vorgewärmt werden.

5. Frage: Wie viel Energie ist für die Wärmeübertragung notwendig (z. B. Ventilatoren, Gebläse etc.)?

Entscheidendes Kriterium für Aussagen zu diesem Punkt ist die Geschwindigkeit, mit der die Wärme übertragen werden muss. Diese wiederum hängt von der Integration dieses Teilprozesses in die gesamte Fertigungskette ab. Für das Beispiel wurden verschiedene Übertragungsgeschwindigkeiten betrachtet. Die Gesamtleistung der Ventilatoren liegt zwischen 2,5 und 10 kW.

6. Frage: Wie viel Energie benötigt der potentielle Empfängerprozess in der aktuellen Prozesskette?

Ein Durchlaufofen mit elektrischer Beheizung hat laut Herstellerangaben [6] einen Wirkungsgrad von ca. 60%. Bei einer notwendigen Wärmemenge von 21,4 kWh entspricht dies einer Stromaufnahme von 35,7 kWh.

7. Frage: Ist eine räumliche Nähe der zu verknüpfenden Prozesse im Fertigungsablauf aus technologischer sowie konstruktiver Sicht realisierbar (Logistik)?

Im Einzelnen müssen hier die Prozesse- bzw. Prozessschrittverkettungen sowie deren räumliche Lage in der Fertigungsstrecke betrachtet werden. Anschließend erfolgt eine technologische Prüfung zur Realisierung von konstruktiven Prozessverknüpfungen, um eine Rekuperation durchführen zu können.

2.3.2 Bilanzierung

Nach Abschluss der Feinanalyse liegen die wichtigsten Daten für eine erste Bilanzierung vor, die Aufschluss über mögliche Einsparpotentiale gibt. Anschließend können erste technologische Entwicklungskonzepte für die Nachnutzung der Energie betrachtet werden. Der Empfängerprozess „Vorwärmen“ wurde gewählt, da die Abwärme des Schmiedeprozesses für das Vorwärmen der Bauteile zum Fügen innerhalb der Prozessschrittverkettung weitergenutzt werden kann. Ermöglicht wird dies durch die Konzeption eines rekuperativen Transportsystems. Bei einem solchen Transportsystem sollte die Förderung der Bauteile in einem geschlossenen System und im Gegenstromprinzip erfolgen.

Um möglichst hohe Energiemengen kurzfristig auf ein anderes Bauteil zu übertragen, muss zusätzlich ein Ventilationssystem zur Erzeugung einer erzwungenen Konvektion installiert werden. Die Takt- und Produktionszeiten sowie technologische Vorgaben geben den Zeitrahmen der Bauteilabkühlung vor. Anhand berechneter Abkühlkurven bei unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten α (siehe Bild 3) kann die Dauer abgelesen werden. Daraus lassen sich die notwendigen Strömungsgeschwindigkeiten und Ventilatorleistungen ableiten. Zu beachten ist hierbei, dass die Leistungsaufnahme des Ventilators proportional zur dritten Potenz der angestrebten Drehzahl verhält. Die benötigte Energie zur Erzeugung der Strömungsgeschwindigkeit muss in der Bilanzierung des Systems mit berücksichtigt werden.

Zur Bilanzierung des Systems können unter Beachtung entsprechender Randbedingungen, wie z. B. möglicher Gefügeveränderungen beim Abkühlen des Bauteils, folgende Varianten gebildet werden (siehe Bild 4):

A freie Konvektion $\alpha = 6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

B erzwungene Konvektion bei $\alpha = 20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

- C erzwungene Konvektion bei $\alpha = 35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- D erzwungene Konvektion bei $\alpha = 50 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- E erzwungene Konvektion bei $\alpha = 150 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

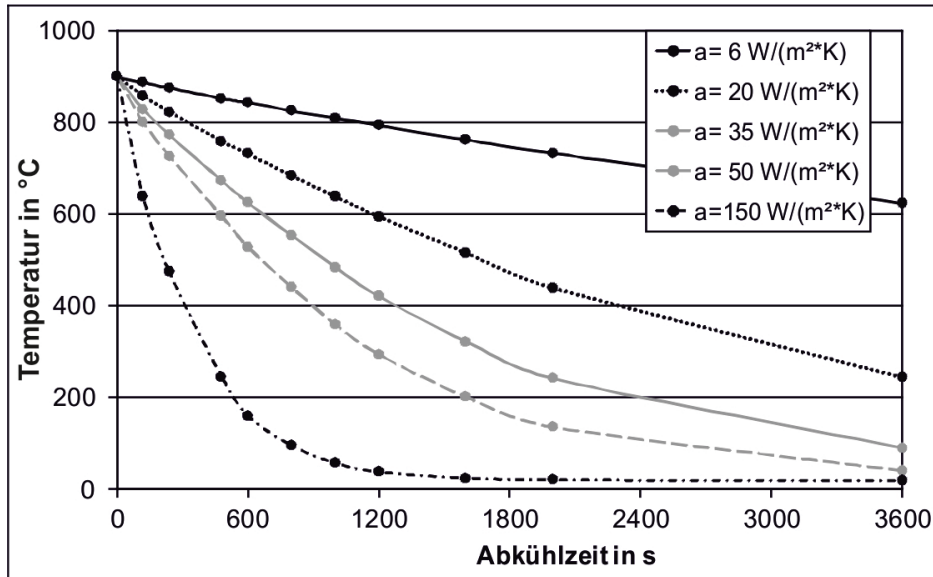
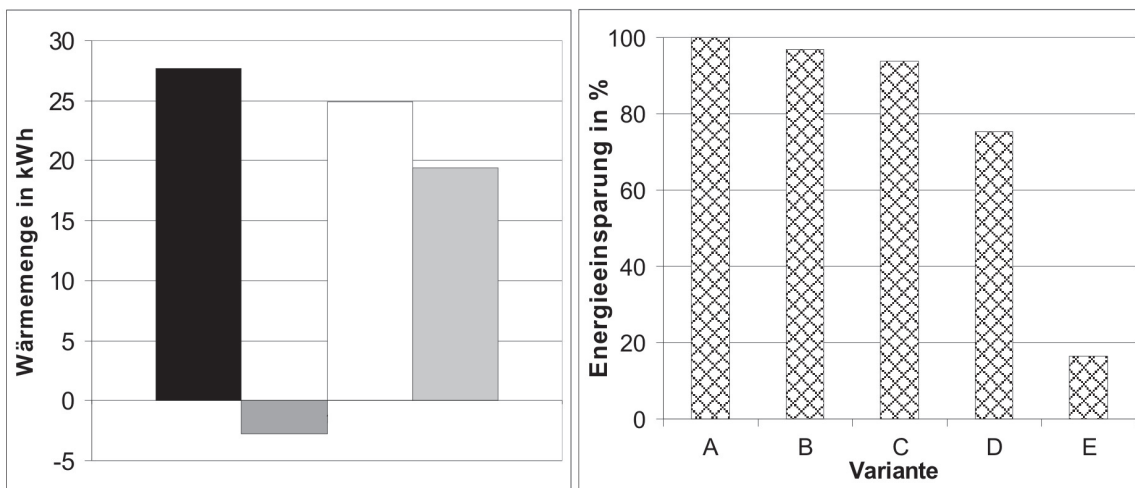


Bild 3: Abkühlkurven durch Konvektion bei verschiedenen Wärmeübergangskoeffizienten α gegen Umgebungstemperatur



- nutzbare Wärmemenge Heißeile
- Wärmeverluste Transportsystem
- Restwärme Heißeile
- notwendige Wärmemenge für Kaltteile
- ▨ Variantenvergleich

Bild 4: a) Bilanzierung Wärmemenge auf 100 Bauteile und b) exemplarische Energieeinsparung der Varianten im Vergleich zum Durchlaufofen

2.3.3 Bewertung

Für eine Bewertung muss neben der Energieeinsparung eine weitere Randbedingung, die Taktzeit, als für die Produktion wesentliche Größe berücksichtigt werden. Aus dem Diagramm Bild 4b wird ersichtlich, dass bei Variante A die meiste Energie eingespart wird (freie Konvektion ohne Ventilatoren). Unter Berücksichtigung der Taktzeit entfällt diese Variante aber für die Bauteilerwärmung innerhalb der betrachteten Prozesskette, da die entsprechende Abkühlkurve eine zu lange Verweilzeit der Bauteile im System verursacht.

Durch den Einsatz von Ventilatoren (Varianten B bis E) wird der Wärmeübergangskoeffizient vergrößert und somit die Abkühl- bzw. Aufheizgeschwindigkeit erhöht. Prinzipiell sind damit nur diese Varianten für die betrachtete Prozesskette von Bedeutung. Hier muss jedoch die Energie für die Motorleistung von der eingesparten Energie zur Erwärmung des Ofens bzw. der Bauteile subtrahiert werden. Mit steigender Anströmgeschwindigkeit und damit exponentiell steigendem Stromverbrauch der Ventilatoren verringert sich die eingesparte Energie und gleichzeitig erhöht sich der konstruktive Aufwand für eine technische Umsetzung. Für das betrachtete Beispiel wurde Variante D als am geeignetsten hinsichtlich Fertigungsverlauf ausgewählt.

3 Lösung

Um derartige Potenziale nutzen zu können, müssen verschiedene logistische und konstruktive Lösungen innerhalb der Produktionslinie integriert werden. Eine Möglichkeit, die Prozessschrittverkettungen (Transport) für derartige Anwendungen zu nutzen, soll hier näher vorgestellt werden. Anhand der Bilanzierung konnte bei der Variante D ein Einsparpotenzial von 75% ermittelt werden. Um diese Variante konstruktiv umzusetzen, muss ein Ventilationssystem integriert sowie eine optimale Wärmeübertragung gewährleistet werden.

Bis auf den Strahlungsanteil muss die Wärme über ein Trägermedium (z. B. Luft) von den heißen auf die kalten Bauteile übertragen werden. Um Verluste zu verringern und die Wärmeübertragung zu verbessern, sollte dies in einem isolierten Arbeitsraum möglichst in einer Gegenbewegung von Heiß- und Kaltteilen erfolgen. Durch die Wahl einer reflektierenden Innenbeschichtung kann der Strahlungsanteil optimal genutzt werden. Ferner sind dafür eine geeignete Gehäuseform und eine Konstruktion ohne Hindernisse (Sichtkontakt) zwischen abgebenden und aufzuwärmenden Bauteilen notwendig. Hierfür eignet sich für den Transport der Kaltteile eine hängende Fördereinrichtung (siehe Bild 5). Als Bauteilgreifer kann ein Dauermagnetwerkstoff mit einer Curie-Temperatur oberhalb der Systemtemperatur genutzt werden, wie z. B. Cobalt (1121°C) oder Eisen (768°C).

Begrenzende Faktoren der Abkühlung/Aufheizung sind dabei die Wärmeleitung in den Bauteilen, der Wärmeübergang an das Trägermedium sowie dessen Wärmekapazität und der Volumenstrom.

Im Beispiel der exemplarischen Prozesskette könnten bei paralleler Prozessführung des Schmiedens und Fügens sowie ähnlichen Massenströmen nach einer Einfahrphase der Ofen ausgeschaltet und dessen Stromaufnahme eingespart werden.

Über die Steuerung der Drehzahl der eingebauten Ventilatoren kann die Geschwindigkeit der Wärmeübertragung flexibel an die Fertigungsprozesse angepasst werden. Mit Hilfe eines solchen Systems ist es möglich den Ofen aus dem Vorwärmprozess zu eliminieren. Daraus folgt die Einsparung eines hochenergetischen Prozesses (siehe Bild 6).

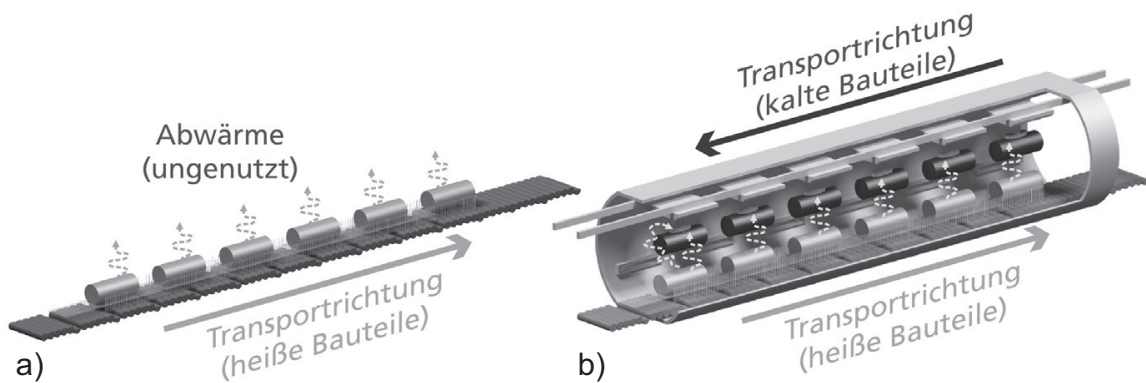


Bild 5: a) konventionelles Transportsystem, b) Konzept eines rekuperativen Transportsystems

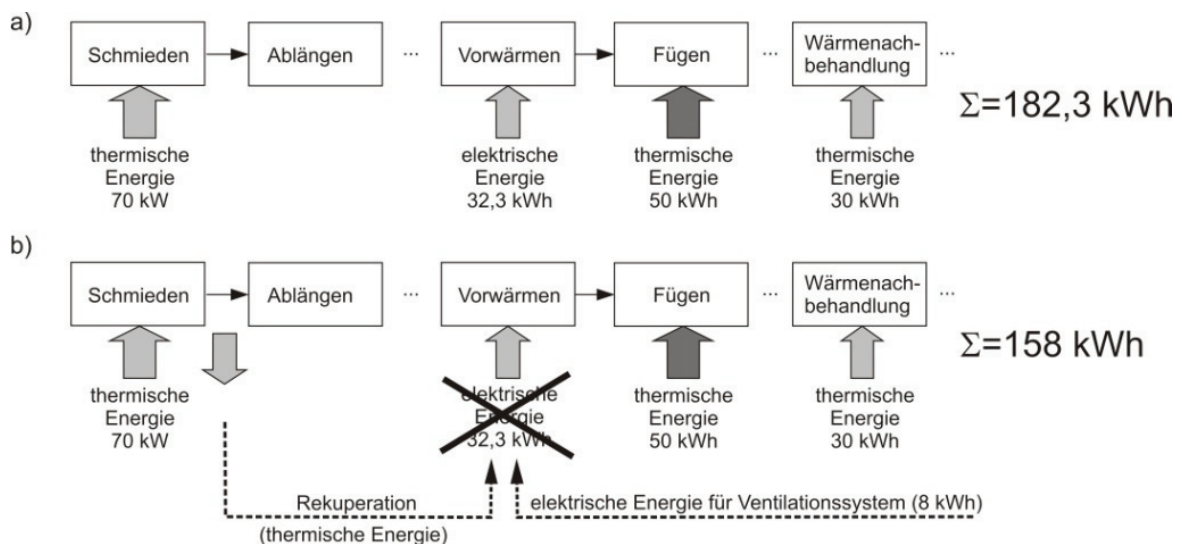


Bild 6: Energetische Bilanzierung a) einer konventionellen und b) einer rekuperativ optimierten Prozesskette

Im Ergebnis kann festgestellt werden, dass bereits aus der Nutzung der Prozessabwärme des Schmiedeprozesses ein Einsparpotenzial von ca. 16% resultiert. Nach einer Einfahrphase der Prozesskette wird damit eine Elimination (Abschaltung) des Ofens für den Vorwärmprozess ermöglicht.

4 Zusammenfassung

Mit Hilfe der vorgestellten Methode können energetische Einsparpotenziale innerhalb einer Produktionsanlage identifiziert werden. Durch eine systematische Untersuchung der Prozesskette (mit der vorgestellten Grob- und Feinanalyse) erfolgt die Auswahl geeigneter Spender- und Empfängerprozesse.

Auf Basis einer Gesamtbilanzierung konnte das Energieeinsparungspotenzial für eine exemplarisch gewählte Prozesskette dargestellt werden. Des Weiteren wurde ein Konzept für die technische Realisierung entwickelt, welches die Werkstoffauswahl für die Einhausung sowie deren Formgebung unter Betrachtung der Emissions- bzw. Reflexionsgrade einschließt. Durch Anwendung dieser Methode wurde eine signifikante Nachnutzung der Verlustwärme zur Energieeinsparung bei der Aufwärmung des Fügeteils erreicht.

Acknowledgement

Die Autoren danken der europäischen Union (Europäischer Fonds für regionale Entwicklung) und dem Freistaat Sachsen für die Förderung des Spitzentechnologieclusters „Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik“ (eniPROD®).



Literaturangaben

- [1] Schnell, H.: *Wärmeaustauscher, Energieeinsparung durch Optimierung von Wärmeprozessen*, 2. Auflage, Vulkan-Verlag, Essen 1994
- [2] Jüttemann, H.: *Wärme- und Kälterückgewinnung*, 4. Auflage, Werner Verlag, Düsseldorf 2001

-
- [3] VDI-Gesellschaft Technische Gebäudeausrüstung: *Wärmerückgewinnung in Raumluftechnischen Anlagen*, VDI-Richtlinie VDI 2071, Beuth-Verlag, Berlin 1997
 - [4] Linnhoff, B.: *Thermodynamic Analysis in the Design of Process Networks*, Dissertation, 1979 Leeds University
 - [5] Morand, R.; Brunner, R.; Pfenniger, H.: *Prozessintegration mit der PINCH-Methode - Handbuch zum BFE Einführungskurs*, Schweizer Bundesamt für Energie, 2006
 - [6] Thermconcept Dr. Fischer GmbH & Co. KG: *Wirkungsgrad elektrisch betriebener Industrieöfen*, Herstellerangabe, August 2012