

Prof. Dr. Beat Wellig, Peter Liem, Donald Olsen, Lukas Gitz
Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Technikumstrasse 21, 6048 Horw
beat.wellig@hslu.ch, www.pinch-analyse.ch

Dr. Andrea Grüniger
Grüniger PLUS GmbH, Flurweg 2a, 5034 Suhr
andrea@grueniger-plus.ch

Integration von Wärmepumpen in industrielle Prozesse mit Hilfe der Pinch-Analyse

Zusammenfassung

Die Reduktion des Energiebedarfs gewinnt für Industrieunternehmen zunehmend an Bedeutung. Der Schlüssel zu höherer Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit ist die energetische Prozessintegration. Mit Hilfe der Pinch-Analyse lässt sich systematisch aufzeigen, wie Energieströme in Prozessen gekoppelt werden müssen, um eine optimale Energieeffizienz bei minimalen Kosten zu erreichen. Die Integration von Wärmepumpen in industrielle Prozesse ist eine nicht zu unterschätzende Herausforderung. Eine korrekt integrierte Wärmepumpe arbeitet über den Pinch, d.h. sie nimmt unterhalb des Pinch-Punkts Wärme auf (wo ein Wärmeüberschuss besteht) und gibt oberhalb des Pinch-Punkts Wärme ab (wo ein Wärmedefizit besteht). In diesem Beitrag wird anhand eines vereinfachten Fallbeispiels aus der Metallverarbeitungsindustrie gezeigt, wie die Integration erfolgt und wie durch die korrekt integrierte Wärmepumpe das Wärmerückgewinnungspotenzial markant erhöht und der Heiz- und Kühlbedarf des Prozesses und damit die Energiekosten reduziert werden können.

Abstract

The reduction of energy consumption is becoming increasingly important for industrial companies. A key to greater energy efficiency and profitability is energetic process integration. Through the use of pinch analysis it can be shown systematically how the required cooling and heating demands in processes must be coupled for better heat recovery in order to achieve optimal energy efficiency at minimal cost. The integration of heat pumps in industrial processes is a challenge that is not to be underestimated. A properly integrated heat pump works across the pinch, i.e. it takes heat from below the pinch point (where an excess exists) and converts the heat to a higher quality above the pinch point (where a deficit exists). In this paper it is shown, using a simplified case study from the metal processing industry, how such an integration is done. In addition, it is shown how the heat recovery potential can be significantly increased through the correct integration of the heat pump as well as how the heating and cooling requirements of the process and thus the energy costs can be reduced.

Einleitung

Ausgangslage

Industrieunternehmen müssen heute vielfältige Anforderungen erfüllen. Die Prozesse sollen nicht nur maximale Wirtschaftlichkeit aufweisen, sondern auch so wenig Energie und Ressourcen wie möglich verbrauchen und geringe Emissionen erzeugen. Zudem führen steigende Energiepreise und Lenkungsabgaben dazu, dass die Erhöhung der Energieeffizienz für den Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit unabdingbar wird.

Klassische Ansätze der Energie-Optimierung konzentrieren sich meistens darauf, die Effizienz einzelner Apparate zu verbessern. Die Erfahrungen zeigen jedoch, dass die optimale Verknüpfung von Energieströmen im Gesamtprozess meist wesentlich grössere Effizienzsteigerungen bringen als die oft kostspielige Verbesserung der Wirkungsgrade einzelner Apparate. „Prozessintegration“ ist der gebräuchliche Oberbegriff für solche systemorientierte und integrale Methoden. Die „Pinch-Analyse“ ist ein wichtiges Werkzeug der Prozessintegration.

Die thermischen Energien zum Aufheizen und Abkühlen von Stoffströmen machen oft einen beträchtlichen Anteil am gesamten Energiebedarf aus. Für die Steigerung der Energieeffizienz ist deshalb die prozessinterne Wärmerückgewinnung (WRG) zentral. Genau hier setzt die Pinch-Analyse an: Sie hilft, unter der Randbedingung von minimalen Kosten das optimale Anlagendesign zu finden und damit den Energieeinsatz zu optimieren und die Wirtschaftlichkeit zu verbessern.

Ziel des Beitrags

Neben Massnahmen zur verbesserten WRG werden heute immer häufiger Wärmepumpen in industriellen Prozessen eingesetzt. Erfahrungen aus verschiedenen Pinch-Analysen zeigen, dass deren korrekte Integration eine nicht zu unterschätzende Herausforderung darstellt. In der Praxis trifft man immer wieder auf Wärmepumpen, die nicht korrekt eingebunden sind. *Der vorliegende Beitrag gibt daher Hinweise zur korrekten Integration von Wärmepumpen in industrielle Prozesse.* Korrekt integrierte Wärmepumpen reduzieren sowohl den Heiz- wie auch den Kühlbedarf des Gesamtprozesses und somit die Betriebskosten erheblich. Die Betrachtungen in diesem Beitrag erfolgen anhand eines realen Fallbeispiels aus der Metallverarbeitungsindustrie, welches aus didaktischen Gründen vereinfacht und adaptiert wurde.

Prozessintegration und Pinch-Analyse

Begriffsdefinition und geschichtlicher Hintergrund

Unter dem Begriff „Prozessintegration“ werden Methoden der integralen Prozessoptimierung verstanden. Prozessintegration steht als Oberbegriff für systemorientierte und ganzheitliche Ansätze, um industrielle Prozesse und Anlagen hinsichtlich Energiebedarf, Investitions- und Betriebskosten, Flexibilität, Ressourcenverbrauch und Emissionen zu optimieren. Die Prozessintegration verfolgt das Ziel, einen Prozess mit einem minimalen Energie- und Ressourcenbedarf sowie minimalen Emissionen unter Einhaltung des geforderten Durchsatzes und der geforderten Produktqualität zu betreiben. Die Pinch-Analyse ist das am weitesten entwickelte Werkzeug der Prozessintegration [1-3].

Die Pinch-Analyse hat ihren Ursprung im angelsächsischen Raum und wurde ursprünglich für Grossanlagen wie Raffinerien und Chemieanlagen entwickelt. In den späten 1970er Jahren etablierte sich die Pinch-Analyse als Design-Tool für die Optimierung von Wärmeübertrager-Netzwerken. Ab Mitte der 1980er Jahren änderte die Strategie der Pinch-Analyse: Seither wird der Ansatz „Targets before Design“ verfolgt. Zuerst werden Energie- und Kostenziele auf Basis von Prozessanforderungen bestimmt und erst dann wird das optimale Anlagendesign entworfen. Ab diesem Zeitpunkt gewann die Integration von Wärme-/Kraft-Kopplungsmaschinen und Wärmepumpen an Bedeutung [4]. Die Regeln zur optimalen Integration von Wärmepumpen in industrielle Prozesse wurden erstmals von Townsend & Linnhoff [5] beschrieben.

Kurze Einführung in die Pinch-Analyse

Wie bereits erwähnt ist für die Steigerung der Energieeffizienz von industriellen Prozessen die prozessinterne WRG von zentraler Bedeutung. Mit einer Pinch-Analyse können Ingenieurinnen und Ingenieure mit der Zielsetzung eines minimalen Gesamtbetrags von Investitions- und Betriebskosten die optimale Verknüpfung der verschiedenen Energieströme aufzeigen. Damit können Massnahmen zur WRG und verbesserten Energieversorgung abgeleitet werden. Die Pinch-Analyse ist sowohl für die Konzipierung von neuen Anlagen wie auch für die Optimierung von bestehenden Produktionsanlagen (Retrofit) ein wertvolles Instrument. Je nach Branche beträgt das Potenzial zur Senkung des Energiebedarfs durch eine Pinch-Analyse bis zu 40% [1].

„Targets before Design“ ist die grundlegende Philosophie der Pinch-Analyse: *Die Bestimmung der Energie- und Kostenziele erfolgt vor dem Design der Anlage.* Anhand eines beispielhaften Prozesses wird die Zielwertfindung kurz beschrieben (Bild 1): In einer Pinch-Analyse werden die aufzuwärmenden und die abzukühlenden Prozessströme in einem Temperatur/Enthalpiestrom-Diagramm zu zwei charakteristischen Kurven zusammengefasst (Bild 1, links). Die «kalte Verbundkurve» (Cold Composite Curve) spiegelt den Wärmebedarf und die «warme Verbundkurve» (Hot Composite Curve) das Wärmeangebot wider. Im überlappenden Bereich ist WRG möglich. Durch horizontales Verschieben der kalten Verbundkurve ändert sich die minimale Temperaturdifferenz ΔT_{\min} zwischen den Kurven sowie das WRG-Potenzial und die benötigte Heiz- und Kühlleistung. Dort wo sich die Kurven berühren ($\Delta T_{\min} = 0 \text{ K}$), befindet sich der „Pinch-Punkt“. Mit der Zielsetzung minimaler jährlicher Gesamtkosten erhält man die optimale Temperaturdifferenz $\Delta T_{\min, \text{opt}}$ zwischen den Verbundkurven (Bild 1, rechts). Im Beispiel-Prozess ergeben sich die kleinsten jährlichen Gesamtkosten bei einer minimalen Temperaturdifferenz von 20 K. Aus den Verbundkurven kann man nun die Zielwerte für die wirtschaftlich optimale Heizleistung (600 kW), Kühlleistung (520 kW) und WRG (3180 kW) herauslesen.

Die minimale Temperaturdifferenz ΔT_{\min} zwischen der heissen und kalten Verbundkurve ist *die* Schlüsselgrösse in einer Pinch-Analyse. Je grösser ΔT_{\min} , umso kleiner ist der überlappende Bereich und damit das Potenzial für WRG. Gleichzeitig wird mehr Heiz- und Kühlleistung benötigt, was zu höheren Betriebskosten führt. Gerade umgekehrt verhalten sich die Investitionskosten für die WRG: Diese sinken mit steigendem ΔT_{\min} , da kleinere Wärmeübertrager benötigt werden (kleinere Leistungen und grössere Temperaturdifferenzen).

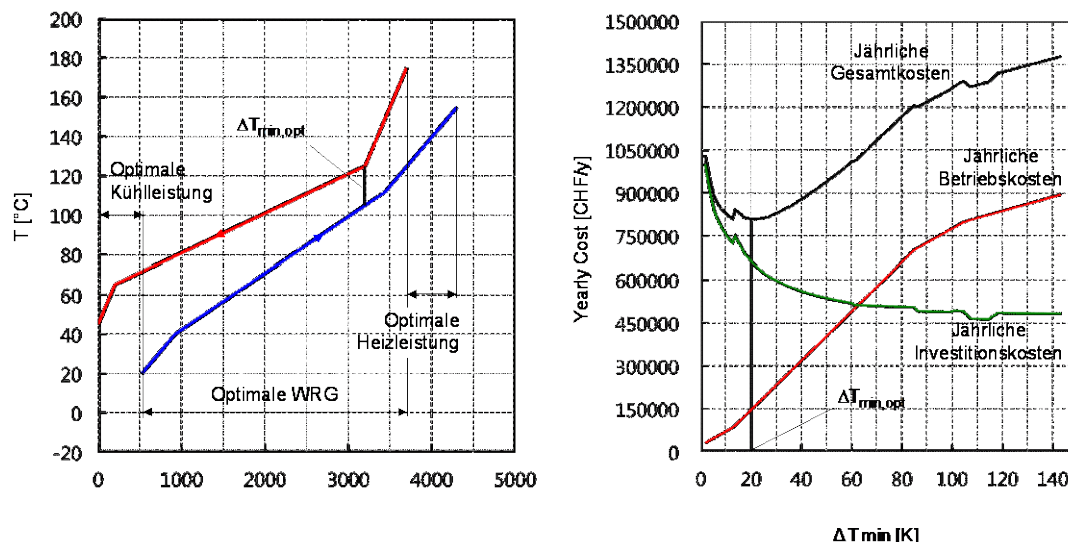


Bild 1: Verbundkurven und Kostenkurven des beispielhaften Prozesses.

In einem nächsten Schritt gilt es, ein Anlagendesign zu entwerfen, mit dem die Energie- und Kostenziele aus den Verbundkurven unter Einhaltung von ΔT_{\min} möglichst nahe erreicht werden. Dies wird durch Kopplung der Ströme mit Wärmeübertragern erreicht (so genanntes Wärmeübertrager-Netzwerk). Beim Design des Netzwerks müssen folgende drei Hauptregeln („Golden Rules“) beachtet werden: (1) externe Wärmezufuhr nur oberhalb des Pinchs, (2) externe Wärmeabfuhr nur unterhalb des Pinchs und (3) keine Wärmetransfer über den Pinch. Aus diesen Hauptregeln kann z.B. unmittelbar abgeleitet werden, dass eine Wärmepumpe Wärme unterhalb des Pinchs aufnehmen und oberhalb des Pinchs abgeben soll (mehr dazu weiter hinten).

Die Pinch-Analyse führt die Anwenderin systematisch zum Ziel einer energetisch und wirtschaftlich optimierten Anlage. Die Durchführung einer Pinch-Analyse lohnt sich bereits bei relativ „einfachen“ Anlagen. Sobald komplexe Anlagen mit Dutzenden von Strömen im Spiel sind, ist die Pinch-Analyse für Unternehmen das wohl einzige praktikable Werkzeug, um zum optimalen Anlagendesign zu gelangen. Die neue Software PinCH unterstützt Anwender dabei Schritt für Schritt.

Engineering-Tool PinCH und BFE-Stützpunkt

Die Hochschule Luzern hat mit der Unterstützung des Bundesamts für Energie (BFE) und der Energie-Agentur der Wirtschaft (EnAW) die anwenderfreundliche Software PinCH für die praktische Durchführung von Pinch-Analysen entwickelt [6]. Mit ihr können Pinch-Analysen zielgerichtet und kostengünstig sowohl in KMU als auch in industriellen Grossbetrieben durchgeführt werden. Der BFE-Stützpunkt an der Hochschule Luzern unterstützt Ingenieurbüros und Industrieunternehmen bei der Durchführung von Pinch-Analysen und beim Umgang mit der Software. Zudem werden praxisorientierte Kurse sowie massgeschneiderte Firmenkurse und Beratungen angeboten (www.pinch-analyse.ch). Das nachfolgend diskutierte Fallbeispiel wurde mit der Software PinCH 2.0 analysiert und optimiert.

Fallbeispiel Metallverarbeitungsbetrieb

Nachfolgend wird die Durchführung einer Pinch-Analyse und die ‚korrekte‘ Integration einer Wärmepumpe in einen industriellen Prozess anhand eines Projekts aus der Metallverarbeitungsindustrie erläutert. Dieses Projekt wurde gemeinsam von der Hochschule Luzern und der Grüniger PLUS GmbH, Suhr, durchgeführt. *Für den vorliegenden Beitrag wurde das Fallbeispiel aus didaktischen Gründen bewusst vereinfacht und in bestimmten Punkten adaptiert. In diesem Beitrag soll nicht das konkrete Fallbeispiel, sondern eine allgemein verständliche Einführung in die Methodik im Vordergrund stehen.*

a) Anlagenbeschreibung und Ist-Zustand

Der erste Schritt der Pinch-Analyse beinhaltet die Erfassung des Ist-Zustands. Wie andere Produktionsbetriebe ist auch der betrachtete Metallverarbeitungsbetrieb historisch gewachsen, wodurch das gesamte System relativ komplexe Verknüpfungen aufweist. In Bild 2 ist ein stark vereinfachtes Schema der Anlagen zu sehen. Diese können in drei Systeme unterteilt werden: Kühlwassersystem, WRG-Kreislauf und Heizsystem.

Es besteht ein grosser Kühlbedarf zur Kühlung von Öfen, Druckluftkompressoren und weiterer Anlagen. Als Kühlmedium steht Wasser in verschiedenen Kühlkreisläufen mit unterschiedlichem Temperaturniveau zur Verfügung. Der Kühlkreislauf 38/50°C wird für die Kühlung der Öfen und der Kühlkreislauf 60/70°C für die Kühlung der Druckluftkompressoren verwendet. Die Rückkühlung dieser Kühlkreisläufe erfolgt durch den Hauptkühlkreislauf 25/31°C, an welchem noch weitere Anlagen angeschlossen sind. Die Wärme wird schliesslich über offene Nasskühltürme an die Umgebung abgegeben (rund 6 GWh/a).

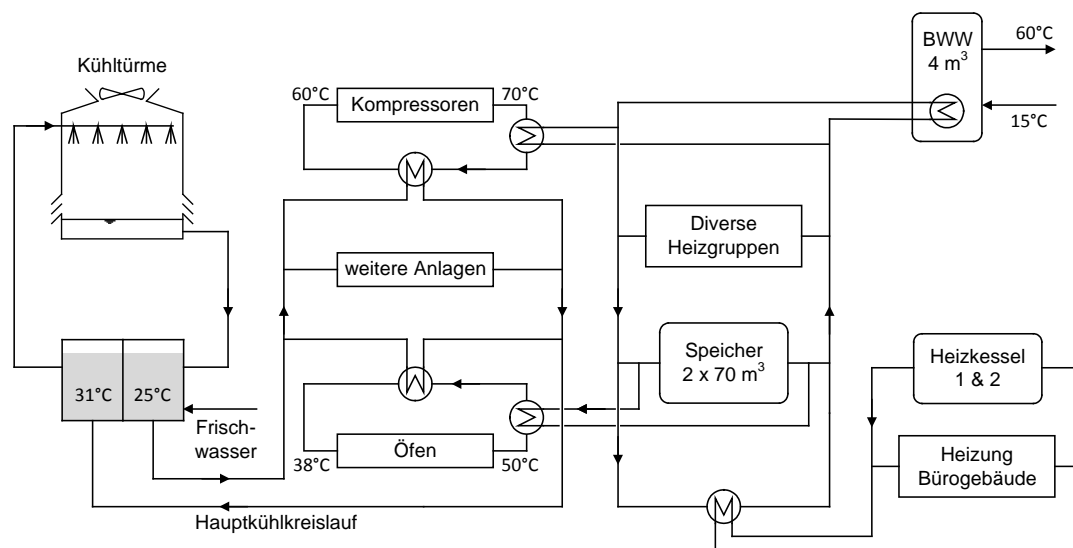


Bild 2: Vereinfachtes Verfahrensfliessbild der Anlagen im Ist-Zustand.

Der WRG-Kreislauf mit integrierten Wärmespeichern nutzt die abzuführende Energie der Öfen und Kompressoren. An den WRG-Kreislauf sind diverse Heizgruppen sowie das Brauchwarmwasser (BWW) als Verbraucher angeschlossen. Zusätzlich kann mit gasbetriebenen Heizkesseln Energie in den WRG-Kreislauf eingespeist werden. Die Heizkessel versorgen zudem das Bürogebäude mit Heizenergie.

Der thermische Energiebedarf des Betriebs beträgt 5 GWh/a. Der jährliche Energieeintrag der Heizkessel beträgt 2.5 GWh/a. Die restlichen 2.5 GWh/a werden mit dem WRG-System abgedeckt. Die jährlichen Energiekosten für den Bezug von Erdgas belaufen sich auf rund 400'000 CHF.

b) Betriebsfälle und Prozessanforderungen

Die Produktion der Metallerzeugnisse wird über das gesamte Jahr als konstant angenommen. Der Gebäudeheizbedarf ist hingegen saisonalen Schwankungen unterworfen. Für eine Pinch-Analyse werden üblicherweise „repräsentative“ *Betriebsfälle* definiert. Im vorliegenden Fall genügt eine einfache Unterteilung in die drei Betriebsfälle „Winter“, „Übergangszeit“ und „Sommer“ (siehe Tabelle 1). Die Werte stellen die gemittelten Wärmeleistungen (aus Heizkesseln, WRG-Kreislauf und total) über die angegebenen Betriebsstunden dar.

Betriebsfall	Betriebsstunden	Heizkessel	WRG	Total
	[h]	[kW]	[kW]	[kW]
Winter (Nov. – März)	2'184	459	381	840
Übergangszeit	1'765	151	381	532
Sommer (Juni – Aug.)	1'331	0	0	0

Tabelle 1: Definition der Betriebsfälle des Metallverarbeitungsbetriebs.

Für jeden Betriebsfall werden die einzelnen Prozessströme, die so genannten *Prozessanforderungen*, definiert (Tabelle 2). Dieser Schritt ist von grosser Wichtigkeit für die nachfolgende Pinch-Analyse. Je ein Prozessstrom wird für den Heizbedarf im Winter und in der Übergangszeit bestimmt, wobei der Heizbedarf des Bürogebäudes und der Heizbedarf der restlichen Heizgruppen zusammengefasst werden. Für die übrigen Prozessströme wurden Mittelwerte berechnet und als konstant angenommen.

Prozessströme	Hot/ Cold	T _{in}	T _{out}	Massenstrom	Kühl-/Heizbedarf
		[°C]	[°C]	[kg/s]	[kW]
BWW	Cold	15	60	0.12	22
Heizung Übergangszeit	Cold	45	60	8.4	532
Heizung Winter	Cold	45	60	13.3	840
Kühlung Öfen	Hot	50	38	14.6	734
Kühlung Kompressoren	Hot	70	60	1.8	75
Kühlung weitere Anlagen	Hot	31	25	19.6	495

Tabelle 2: Prozessanforderungen der für die Pinch-Analyse relevanten Prozessströme. Bei allen Prozessströmen handelt es sich um Wasser. Die aufzuwärmenden Prozessströme (Wärmebedarf) sind mit „Cold“, die abzukühlenden Prozessströme (Wärmeangebot) mit „Hot“ gekennzeichnet.

Für die „externe“ Energieversorgung des Prozesses (Heizung/Kühlung) werden so genannte Utilityströme definiert. Ein Utilitystrom beschreibt ein Stoffstrom der Energieversorgung (z.B. Heissdampf, Thermoöl, Kühlwasser, Eiswasser, Kältemittel usw. [1]). Die Hot-Utility (HU) ist im vorliegenden Fall das Rauchgas aus der Verbrennung von Erdgas (Kosten 81 CHF/MWh). Die Cold Utility (CU) ist die Umgebungsluft, welche über den Kühlturm die Abwärme aus dem Prozess aufnimmt (Kosten 10 CHF/MWh).

Für die Pinch-Analyse ist der Betriebsfall Winter entscheidend. Im Winter besteht der höchste Energiebedarf und dieser Betriebsfall weist die meisten Betriebsstunden auf. Somit können im Betriebsfall Winter mit einem optimalen Wärmeübertrager-Netzwerk die grössten Einsparungen erzielt werden.

c) Verbundkurven (Composite Curves, CC)

In Bild 3 sind die Verbundkurven für den Betriebsfall „Winter“ dargestellt. Die Verbundkurven setzen sich aus den Prozessanforderungen gemäss Tabelle 2 zusammen. Die kalte Verbundkurve (Wärmebedarf) besteht aus den Strömen BWW und Heizung und die heisse Verbundkurve (Wärmeangebot) aus den Strömen Kühlung Kompressoren, Öfen und weitere Anlagen. Im Betriebsfall „Winter“ ist die Pinch-Temperatur 48.8°C , $\Delta T_{\text{min,opt}} = 2.5 \text{ K}$ (stark beeinflusst durch Energiekosten) und das WRG-Potenzial beträgt 230 kW. Aus den Verbundkurven erkennt man, dass ein Teil der abzuführenden Energie der Öfen für das Heizwasser verwendet werden kann und dass die gesamte abzuführende Energie der Kompressoren mittels WRG nutzbar ist. Der Heizbedarf kann jedoch nur teilweise mit WRG gedeckt werden; der restliche Teil muss durch die Heizkessel bereitgestellt werden (Hot Utility „Erdgas“, 630 kW). Der grösste Teil der abzuführenden Energie aus den Öfen und weiteren Anlagen muss an die Umgebung abgeführt werden (Cold Utility „Kühlturm“, 1042 kW).

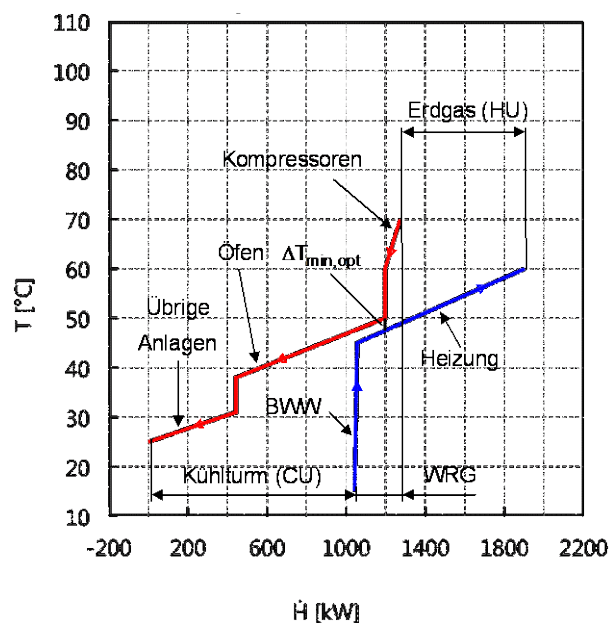


Bild 3: Verbundkurven (Composite Curves) für den Betriebsfall „Winter“ für ein $\Delta T_{\text{min,opt}}$ von 2.5 K (Diagramm aus Software PinCH 2.0).

d) Gesamt-Verbundkurve (Grand Composite Curve, GCC)

Aus den Verbundkurven kann die Gesamt-Verbundkurve in Bild 4 abgeleitet werden. Die Gesamt-Verbundkurve zeigt auf, wieviel „Netto-Wärmedefizit“ (Heizbedarf) bzw. „Netto-Wärmeüberschuss“ (Kühlbedarf) auf welchem Temperaturniveau vorhanden ist. Beim Pinch-Punkt ist gerade weder ein Wärmedefizit noch ein Wärmeüberschuss vorhanden. Man beachte: Die aus der Gesamt-Verbundkurve abgelesenen Temperaturen entsprechen nicht den realen Temperaturen. Um die realen Temperaturen zu erhalten, müssen die Temperaturen oberhalb des Pinchs um ein halbes ΔT_{min} (1.25 K) erhöht und die Temperaturen unterhalb des Pinchs um ein halbes ΔT_{min} reduziert werden (Details siehe z.B. [1-

3)). Oberhalb des Pinchs existiert ein Wärmedefizit von 630 kW auf einem Temperaturniveau von 60°C. Im Ist-Zustand wird dieses Wärmedefizit mit Hot Utility (Erdgas) ausgeglichen. Unterhalb des Pinchs herrscht ein Wärmeüberschuss von insgesamt 1042 kW, welcher über den Kühlturm abgeführt wird (Abwärme). Diese abzuführende Energie fällt auf unterschiedlichen Temperaturniveaus an: Bei 38°C beträgt der Wärmeüberschuss 606 kW, bei 25°C entspricht er gerade den CU von 1042 kW.

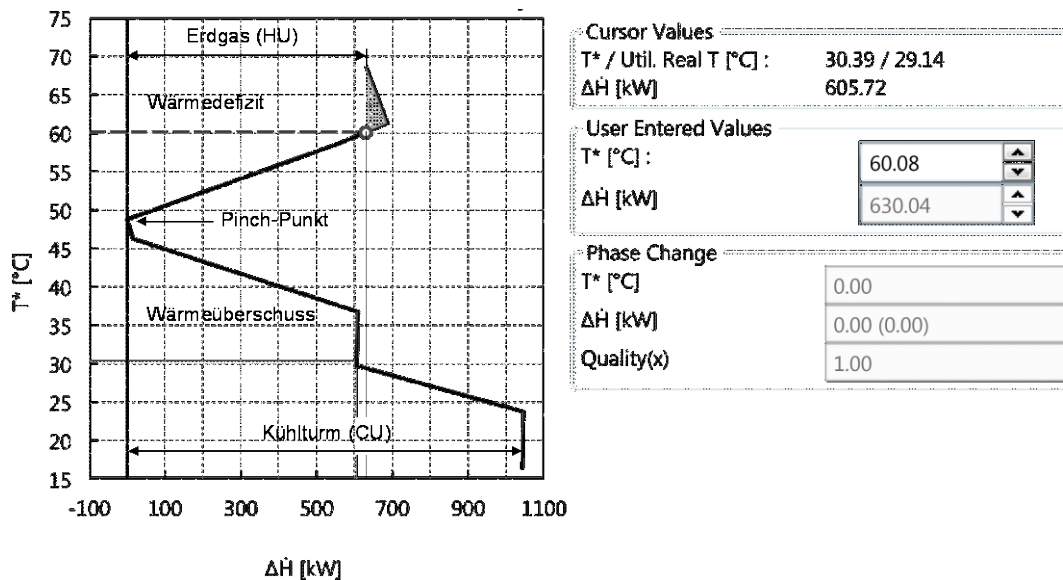


Bild 4: Gesamt-Verbundkurve (Grand Composite Curve) für den Betriebsfall „Winter“ für ein $\Delta T_{\min, \text{opt}}$ von 2.5 K (Diagramm aus Software PinCH 2.0).

e) Integration einer Wärmepumpe

Wie integriert man eine Wärmepumpe in diesen Prozess? – Generell gilt, dass die Integration einer Wärmepumpe in einen industriellen Prozess sinnvoll ist, wenn diese *Wärme unterhalb des Pinchs aufnimmt* (wo ein Wärmeüberschuss besteht) und *Wärme oberhalb des Pinchs abgibt* (wo ein Wärmedefizit besteht). Man sagt: Die Wärmepumpe „arbeitet über den Pinch“ [1-3].

Arbeitet eine Wärmepumpe nur unterhalb des Pinchs, wird der Wärmeüberschuss erhöht und die Verdichterleistung muss zusätzlich über den Kühlturm abgeführt werden. Die Kosten für die Cold Utility steigen. Die Integration einer Wärmepumpe nur oberhalb des Pinchs hat eine Reduktion der Hot Utility um die Verdichterleistung zur Folge. Energetisch gesehen entspricht diese Integration einer elektrischen Heizung.

Fazit: Eine „korrekt integrierte“ Wärmepumpe arbeitet über den Pinch (bezüglich Ausnahmen sei an dieser Stelle z.B. auf das BFE-Handbuch [1] verwiesen). Mit einer so integrierten Wärmepumpe können gleichzeitig der Heiz- und Kühlbedarf und die damit verbundenen Betriebskosten reduziert werden. Aus der Lage des Pinch-Punkts und der „Form“ der Gesamtverbundkurve erkennt man rasch, ob die Integration einer Wärmepumpe sinnvoll ist bzw. ob eine bereits vorhandene Wärmepumpe korrekt in den Prozess integriert ist.

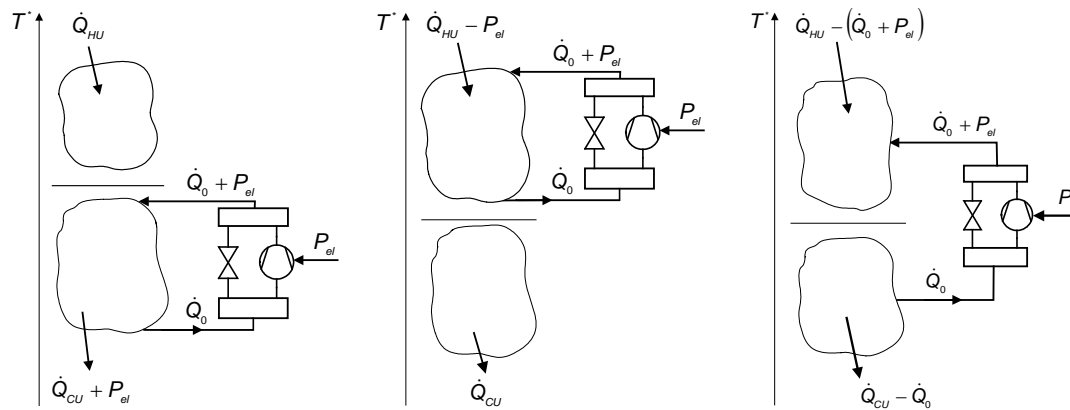


Bild 4: Links/Mitte: Falsche Platzierung einer Wärmepumpe; sie arbeitet ausschliesslich unterhalb bzw. oberhalb des Pinchs. Rechts: Korrekte Platzierung einer Wärmepumpe; Verdampfer unterhalb, Kondensator oberhalb Pinch.

f) Energie- und Kostenziele mit integrierter Wärmepumpe

Mit diesen Erkenntnissen lässt sich die Wärmepumpe korrekt in den Prozess integrieren. Die Software PinCH verfügt über eine Vielzahl von praktischen Features für die Wärmepumpen-Integration (Stoffdaten von Kältemitteln, Kreisprozessberechnung, Kostenberechnung usw.).

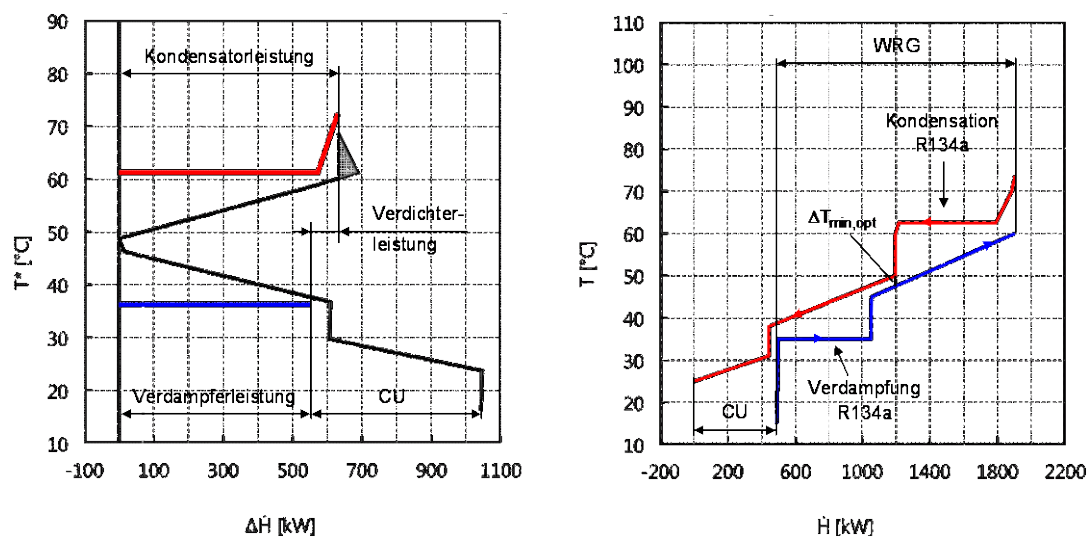


Bild 5: Links: Gesamt-Verbundkurve mit Verdampfung und Kondensation des Kältemittels R134a. Rechts: Verbundkurven des Prozesses für ein $\Delta T_{\min, \text{opt}}$ von 2.5 K mit integrierter Wärmepumpe (Diagramme aus Software PinCH 2.0).

Aus der Gesamtverbundkurve können die Temperaturniveaus und Wärmeleistungen des Verdampfers und Kondensators festgelegt werden. Im vorliegenden Fall wurde eine Wärmepumpe mit R134a als Kältemittel gewählt. In Bild 5 (links) sind die Verdampfung und Kondensation für den optimalen Fall in der Gesamtverbundkurve eingezeichnet. Die Verdampfungstemperatur liegt bei 35°C und die Kondensations-temperatur beträgt 62.5°C. Damit ergibt sich ein minimaler innerer Temperaturhub von 27.5 K. Die Kondensatorleistung wurde so gewählt, dass gerade kein Erdgas (Hot Utility) mehr benötigt wird (630 kW). Bezüglich Energieeffizienz handelt es sich um die bestmögliche Integration, aus Praxissicht gibt es jedoch Einschränkungen (siehe Abschnitt „Optimierte Anlage“ weiter unten).

In Bild 5 rechts ist ersichtlich, dass mit der Integration der Wärmepumpe die Verbundkurven eine wesentlich grössere Überlappung erreichen: Das WRG-Potenzial beträgt neu 1405 kW (im Vergleich zu 230 kW ohne Wärmepumpe). Rund 75% der anfallenden Energie aus den Öfen kann mit der Wärmepumpe genutzt werden, um den gesamten Heizbedarf zu decken. Die Hot Utility (Erdgas) wird um die Kondensatorleistung der Wärmepumpe von 630 kW und die Cold Utility (Kühlturm) um die Verdampferleistung von 560 kW reduziert.

g) Wärmeübertrager-Netzwerk

Nachdem die Energie- und Kostenziele definiert sind, muss ein Anlagendesign ausgearbeitet werden, welches die gesteckten Ziele erfüllt („Targets before Design“). Mit der Software PinCH kann ein geeignetes Wärmeübertrager-Netzwerk erstellt werden (siehe Bild 6).

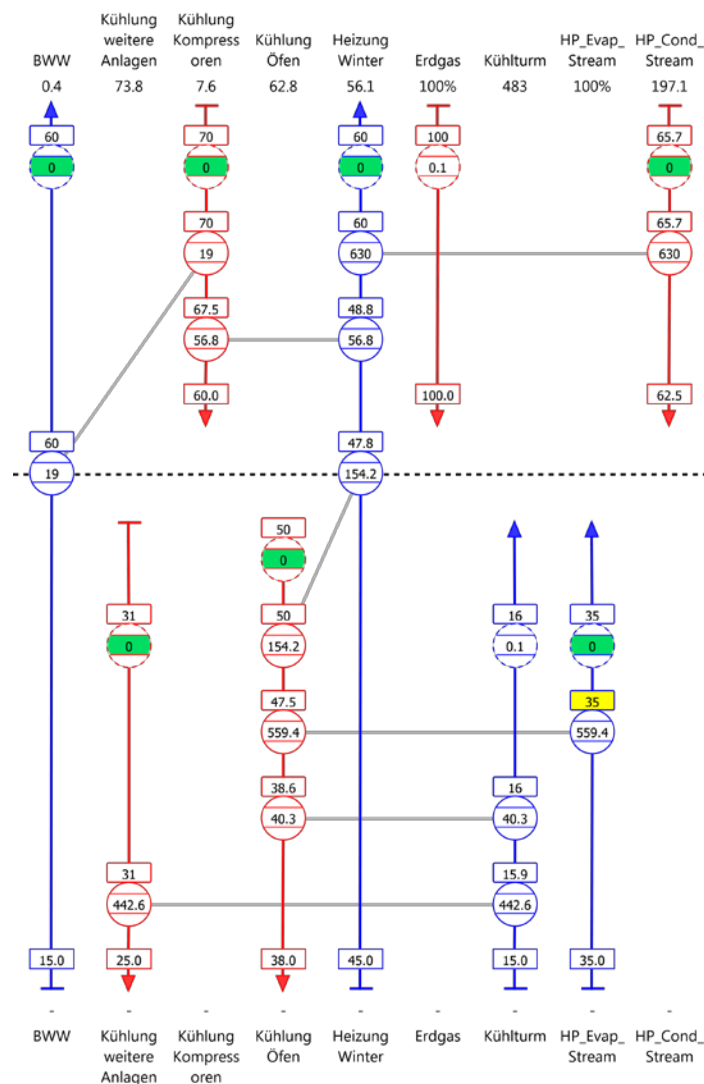


Bild 6: Wärmeübertrager-Netzwerk (Relaxed Heat Exchanger Network) für den Betriebsfall „Winter“ mit integrierter Wärmepumpe (aus Software PinCH 2.0).

Optimierte Anlage

Die Pinch-Analyse zeigt Schritt für Schritt auf, wie die Energieeffizienz mittels WRG verbessert und wie eine Wärmepumpe optimal integriert werden kann. Es zeigt sich, dass BWW-Aufbereitung während der Produktion direkt mit der Kühlenergie der Kompressoren erfolgen kann (d.h. Abkopplung vom WRG-Kreislauf). Für die Revisionszeit empfiehlt sich ein elektrisches Heizregister für die BWW-Aufbereitung, anstatt den weitläufigen WRG-Kreislauf mit den erdgasbetriebenen Heizkesseln auf Temperatur zu halten.

Gemäss Gesamtverbundkurve soll mit der Wärmepumpe die Kühlenergie der Öfen als Wärmequelle genutzt werden. Genauere Abklärungen haben ergeben, dass die Temperaturen des Ofen-Kühlwassers relativ stark schwanken (in der Pinch-Analyse werden für die Prozessanforderungen Mittelwerte verwendet). Für die Einbindung der Wärmepumpe ist es sinnvoller, das Kühlwasser im Warmwasserbecken zu nutzen, welches eine relativ konstante Temperatur von 31°C aufweist. Gleichzeitig ist durch die Speicherwirkung des Warmwasserbeckens ein kontinuierlicher Leistungsbezug garantiert. Somit ergeben sich eine Quelltemperatur von ca. 30°C und eine Senktemperatur von 60°C. Die Regeln der Wärmepumpen-Integration gemäss Gesamtverbundkurve sind immer noch erfüllt.

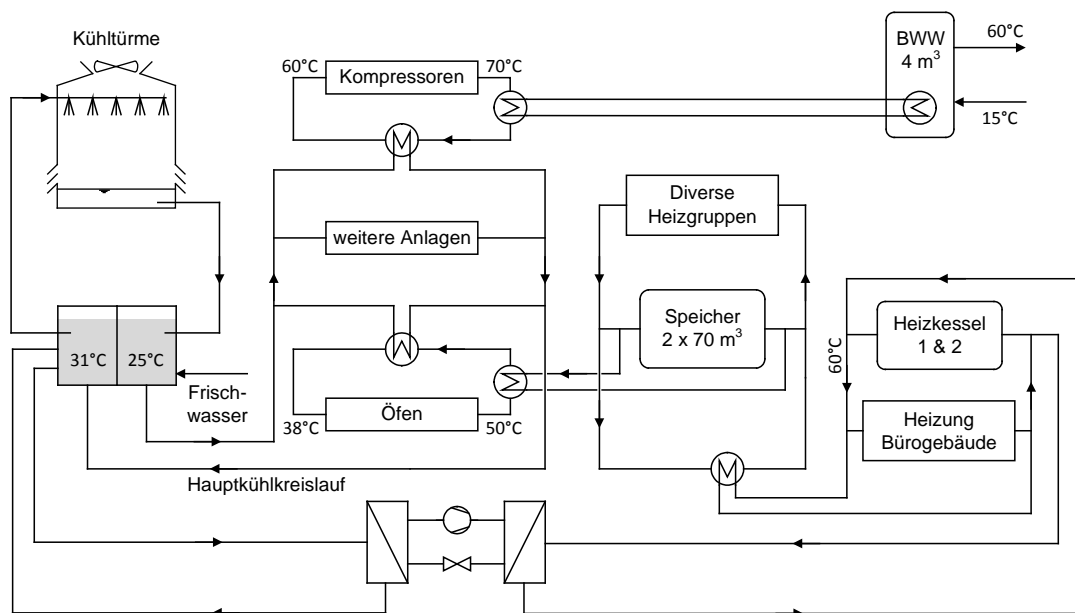


Bild 7: Vereinfachtes Verfahrensfliessbild des optimierten Prozesses mit integrierter Wärmepumpe.

Für den Betriebsfall „Winter“ ergibt sich gemäss Pinch-Analyse ein gemittelter Heizbedarf von 630 kW. Da jedoch zwei Heizkessel bereits bestehen, ist eine bivalente Lösung wirtschaftlich günstiger. Die Untersuchungen mittels Heizkurve und Klimadaten ergaben, dass mit 400 kW Heizleistung bei 5°C Aussentemperatur mit einer Wärmepumpe ein Deckungsgrad von 80% des jährlichen Heizbedarfs erreicht wird. Es wurde empfohlen, eine Wärmepumpe mit einer Heizleistung von rund 400 kW zu installieren und die Heizkessel als Backupsystem und zur Abdeckung der Spitzenheizlast zu verwenden.

Eine offerierte Variante sieht eine Wärmepumpe mit einer Heizleistung von 384 kW vor; der COP beträgt 4.3 vor (Angaben bei W28/W60). Die Wärmepumpe wird mit einem zweistufigen Schraubenverdichter (75%/100%) betrieben und als Kältemittel wird R134a verwendet. Mit dem Einbau der Wärmepumpe können (mit den heutigen Energiepreisen gerechnet) jährlich 85'000 CHF Energiekosten eingespart werden. Demgegenüber stehen Investitionskosten von rund 330'000 CHF. Die Amortisationszeit der Wärmepumpe beträgt ca. 4 Jahre.

Schlussfolgerungen

Die Integration von Wärmepumpen (und weiteren Systemen wie z.B. Blockheizkraftwerken (BHKW) oder Organic Rankine Cycle (ORC)-Anlagen) in industrielle Prozesse ist eine nicht zu unterschätzende Herausforderung. Bei komplexen Prozessen ist eine Pinch-Analyse unabdingbar. Sie zeigt systematisch auf, ob und wie solche Systeme in industrielle Prozesse integriert werden können. Das Fallbeispiel aus der Metallverarbeitungsindustrie zeigt, dass das WRG-Potenzial durch eine korrekt integrierte Wärmepumpe markant erhöht und gleichzeitig der Heiz- und Kühlbedarf reduziert werden. Bezüglich korrekter Integration von BHKW, ORC-Anlagen usw. sei an dieser Stelle auf die einschlägige Literatur verwiesen [2,3].

Quellen

- [1] F. Brunner, P. Krummenacher: Einführung in die Pinch-Methode – Handbuch für die Analyse von kontinuierlichen Prozessen und Batch-Prozessen, Bundesamt für Energie, 2014.
- [2] I. Kemp: Pinch Analysis and Process Integration – A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy, Second Edition, Elsevier Ltd., Oxford, UK, 2007.
- [3] R. Smith: Chemical Process Design and Integration, John Wiley & Sons, Chichester, England, 2005.
- [4] D. W. Townsend, B. Linnhoff: Heat and Power Networks in Process Design, AIChE Journal, 1983, No. 5, 742-748.
- [5] B. Linnhoff: Pinch-Analysis – a state-of-the-art overview, Trans IChemE, 1993, Vol. 71, Part A, 503-522.
- [6] D. Olsen, B. Wellig: Practical Heat Integration Analysis in the Process Industries, World Engineers Convention, Geneva, 2011.