

Ressourceneinsparung durch betriebsübergreifende Prozessintegration auf Grundlage der Pinch-Analyse

VON DIPL.-WI.-ING. JENS LUDWIG¹, DR. MICHAEL HIETE¹, DR. MARTIN TREITZ¹, PROF. DR. OTTO RENTZ¹ UND PROF. DR. JUTTA GELDERMANN²

¹ Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU / IFARE), Universität Karlsruhe (TH)

² seit 2006: Professur für Produktion und Logistik, Universität Göttingen

In dem von 2004-2006 vom DFIU durchgeführten Forschungsprojekt PepOn "Integriertes Prozessdesign für die betriebsübergreifende Anlagenplanung in dynamischen Stoffstromnetzen" wurden verschiedene Formen der Pinch-Analyse zu einer umfassenden Methode zur integrierten Technikbewertung und zur Optimierung von überbetrieblichen Stoffstromnetzen weiterentwickelt. Damit können Einsparpotenziale durch die Prozessverschaltung gemeinsam angesiedelter Unternehmen erreicht werden, wie es hier beispielhaft für drei Unternehmen in Chile gezeigt wird.

Einleitung

Der Energie- und Ressourceneinsatz in Industrieunternehmen ist mit Umweltbelastungen und Kosten verbunden. Eine Erhöhung der Energie- und Ressourceneffizienz ist daher eine Herausforderung für jedes Unternehmen. Während hierbei in den Industrieländern bereits große Erfolge erzielt

wurden, besteht in Schwellenländern nach wie vor ein großes Potenzial zur Effizienzsteigerung. Dieses ist auch eine Folge der Unternehmensstruktur in diesen Ländern, die von vielen kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) geprägt wird, in denen das Know-How für eine integrierte Anlagenplanung und -optimierung häufig nicht in ausreichendem Maße vorhanden ist. Neben der Optimierung einzelner Anlagen oder Prozesse bietet die betriebliche und überbetriebliche Verschaltung von Stoff- und Energieströmen ein beträchtliches Effizienzpotenzial. Eine Methode, mit der Einsparpotenziale durch eine betriebliche und überbetriebliche Prozessintegration berechnet werden können, ist die Pinch-Analyse. Bisher wurde die Pinch-Analyse hauptsächlich für die innerbetriebliche Anlagenplanung in der Prozessindustrie angewendet. Die Übertragung auf das überbetriebliche Energie- und Stoffstrommanagement war Gegenstand des Forschungsprojekts PepOn "Integriertes Prozessdesign für die betriebsübergreifende Anlagenplanung in dynamischen Stoffstromnetzen" [Geldermann et al. (2006a)], das 2004-2006 vom DFIU durchgeführt und von der VolkswagenStiftung gefördert wurde.

Pinch-Analyse von Wärmeströmen

Ziel der Pinch-Analyse von Wärmeströmen ist es, den minimalen Energieverbrauch eines Systems als theoretisches Ziel einer optimalen Wiederverwendung anfallender Prozesswärme und -kälte in anderen Prozessen zu bestimmen [Linnhoff et al. (1979), Linnhoff, Turner (1981)]. Hierfür

werden zunächst die aufzuwärmenden (im Folgenden kurz "kalte") und abzukühlenden ("warme") Ströme identifiziert und charakterisiert. Die zentralen Parameter sind dabei die Eingangs- und Ausgangstemperaturen der Ströme sowie deren Massenströme und Wärmekapazitäten, woraus sich dann die auf- oder abzugebende Wärmeenergie pro Zeit (die Wärmeleistung) berechnen lässt. Anstelle von Wärmeleistung wird bei der Pinch-Analyse meist von Enthalpieänderung oder nur von der Enthalpie H gesprochen. Die Enthalpie beschreibt den Energieinhalt eines Systems. Die Anfangs- und Endtemperaturen und zugehörigen Enthalpien der einzelnen Abkühlungs- und Aufwärm Schritte werden dann in ein Enthalpie-Temperatur (H, T) Diagramm eingezeichnet und durch Linien verbunden. Da für die Wärmeübertragung nur die Enthalpieänderung von Bedeutung ist, können die einzelnen Strecken der Teilprozesse horizontal verschoben und so zu einer warmen und einer kalten Summenkurve zusammengefasst werden (vgl. Abbildung 1). Außerdem ist ein minimaler Temperaturgradient (ΔT_{\min}) festzulegen, der mindestens für eine Wärmeübertragung gegeben sein muss. ΔT_{\min} hängt dabei von den verwendeten Wärmetauschern ab.

Für eine Wärmeübertragung muss die warme Summenkurve überall oberhalb der kalten liegen. Dieses kann durch horizontales Verschieben erreicht werden. Um eine Wärmeübertragung zu gewährleisten, muss der vertikale Abstand (also die Temperaturdifferenz) der beiden Summenkurven mindestens ΔT_{\min} sein. Der Punkt, an dem der Abstand genau ΔT_{\min} ist, wird Pinch-Punkt

genannt. Der Pinch-Punkt teilt das System in zwei Teile (vgl. Abbildung 1), innerhalb derer die Ströme zur Wärmerückgewinnung verschaltet werden können. Der horizontale Bereich der Überlappung beider Kurven gibt dabei die maximale Wärmerückgewinnung an. Im Beispiel in Abbildung 1 müssen lediglich die Wärmemengen $Q^*_{Cold,min}$ und $Q^*_{Hot,min}$ noch ab- bzw. zugeführt werden. Auf grafischem Wege wird letztlich der minimale Wärmebedarf und damit das thermodynamische Optimum bestimmt.

In der Praxis spielen natürlich Kosten eine zentrale Rolle: vermiedenen Kosten für Wärme- und Kälteerzeugung stehen zusätzliche Kosten für die Wärmeübertragung gegenüber. Als Maß für die Kosten für die Wärme- und Kälteerzeugung eignet sich die zuzuführende Wärme- oder Kältemenge allein übrigens nur bedingt: Kühlwasser bspw. ist verglichen mit Kälte meist sehr günstig, d. h. die Temperaturniveaus sind bei der Kostenbetrachtung einzubeziehen. Auf rechnerischem Wege kann neben dem thermodynamischen letztlich auch ein wirtschaftliches Optimum berechnet werden. In beiden Fällen findet der aus dem Operations Research bekannte Transportalgorithmus Anwendung, wobei entweder allein die Möglichkeiten der Wärmeübertragung betrachtet werden können (thermodynamisches Optimum), oder diese gleichzeitig auch mit Kostenfunktionen belegt werden (ökonomischer Ansatz) [Cerdea et al. (1983)].

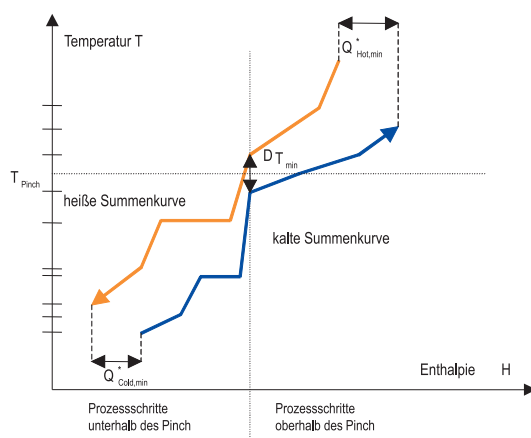
Für dieses Wärmepinch-Problem sind spezielle Software-Pakete erhältlich. Im Projekt PepOn wurden alle Berechnungen in einem mit MATLAB® erstellten Tool durchgeführt. Dieses enthält ebenso die anschließend kurz vorgestellten Pinch-Analysen von Wasser- und VOC-Strömen sowie die Zusammenführung der Ergebnisse in einer Mehrzielentscheidungsunterstützung.

Pinch-Analyse von Wasserströmen

Das Prinzip der Pinch-Analyse, der optimalen Verschaltung von Wärmeströmen, kann auch auf andere Ströme übertragen wer-

den. Bspw. sind Prozessabwässer häufig nur durch wenige Stoffe verschmutzt, die zwar eine Reinigung des Abwassers vor Einleitung in den Vorfluter erforderlich machen, einer Weiterverwendung in anderen Prozessen - ggf. nach Aufbereitung oder Verschneidung mit Frischwasser oder schwächer oder anders belasteten Wässern - jedoch nicht im Wege stehen. Hierdurch bieten sich enorme Einsparpotenziale für den Frischwasserverbrauch.

Im Fall eines einzigen Stoffes kann anstatt der Temperatur-Enthalpie-Beziehung beim Wärme-Pinch bspw. das Verhältnis der Konzentration des Stoffes (statt der Tempe-



▲ **Abbildung 1: Summenkurven der heißen und kalten Prozessströme im H, T-Diagramm**

ratur) zum Massenfluss (statt der Enthalpie) verwendet werden. Der Massentransfer vom beladenen zum weniger stark beladenen Strom kommt durch Vermischen zustande [Mann, Liu (1999)]. Hierfür müssen die Wasserflüsse, die maximal tolerierbaren Eingangskonzentrationen des Stoffes und die zusätzlichen Beladungen der Wasserströme mit dem Stoff in den einzelnen Prozessen oder Prozessschritten bekannt sein. Im Einparameterfall wird durch Kombination der benötigten Prozesswasserströme eine Summenkurve gebildet, welche die "schlechteste" akzeptable Wasserqualität für alle Prozesse beschreibt. Eine Frischwasserkurve kann an die Wasserbedarfskurve mit Berührung im Pinch-Punkt angelegt werden. Ihre Steigung bestimmt die mi-

nimale Flussrate der Frischwasserversorgung des Systems [Wang, Smith (1994)]. Für die Berechnung des pH-Wertes ist beim Vermischen zu berücksichtigen, dass es sich hierbei um den negativen dekadischen Logarithmus der Konzentration (bzw. Aktivität) der H^+ -Ionen (bzw. H_3O^+ -Ionen) handelt. Das Problem wird komplexer, wenn - wie in der Praxis üblich - die Wasserqualität durch mehrere Parameter festgelegt wird.

Pinch-Analyse von VOC-Strömen

Die Bezeichnung flüchtige organische Verbindungen (Volatile Organic Compounds, VOC) bezieht sich auf eine große Anzahl chemischer Verbindungen, die meist als Lösungsmittel eingesetzt werden. In der Atmosphäre führen VOC zur Bildung von Photooxidantien wie bodennahem Ozon. VOC-Emissionen sind daher ein Hauptverursacher für den Sommersmog. Ein gängiges Verfahren zur Minderung von VOC-Emissionen ist die Auskondensation von VOC aus der Abluft bei niedrigen Temperaturen. Die notwendigen Temperaturniveaus werden Phasendiagrammen entnommen, welche die physikalischen Eigenschaften einzelner VOC wiedergeben. Die Abscheidung von VOC mittels Kondensation kann daher ebenfalls als Wärmetauscher-Problem beschrieben werden [Dunn, El-Halwagi (1994), Parthasarathy, El-Halwagi (2000)]. Im Gegensatz zum klassischen Wärme-Pinch ist hierbei die Kondensationswärme der VOC bei der Berechnung der Wärmeleistung einzubeziehen.

Fallstudie: Chilenischer Industriepark

Während die Pinch-Analyse in Großbetrieben, z. B. der Chemischen Industrie, standardmäßig mit Erfolg angewandt wird, bieten kleinere Anlagen oft nicht genug Einsparpotenzial für eine ökonomisch sinnvolle Integration der Wärme-, Wasser- und/oder VOC-Ströme. Hier übersteigen die investitionsabhängigen Kosten die Kostenreduktionen durch Effizienzerhöhung meist deutlich. Grund hierfür sind häufig die räum-

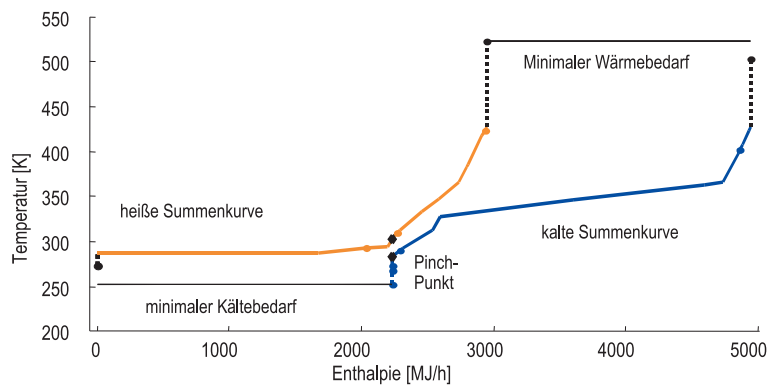
lichen Distanzen, die es für eine Prozessintegration zu überwinden gilt. Bei einer Neuansiedlung von Unternehmen bieten sich jedoch Möglichkeiten für eine räumlich nahe und damit ökonomisch eher vertretbare Prozessintegration.

Dieses soll beispielhaft anhand eines einfachen Wärme-Pinches für drei kleinere und mittlere Unternehmen (KMU) in Chile verdeutlicht werden. Für die Untersuchung wurde angenommen, dass sich die Unternehmen mit aktuell noch getrennten Standorten an einem gemeinsamen Produktionsstandort ansiedeln.

Bei den drei Unternehmen, die ihre realen Prozessdaten für die Fallstudie zur Verfügung stellten, handelt es sich um

1. ein mittelständisches Unternehmen, welches Pisco (einen landestypischen Weinbrand ähnlich dem Grappa) herstellt; am energieaufwendigsten ist hierbei die Destillation und das Kühlen bei der Fermentation,
2. ein Lackierunternehmen für Fahrräder und Bettgestelle; der Großteil des Energieverbrauchs entfällt dabei auf das Trocknen nach jedem Lackierschritt in Öfen,
3. ein Unternehmen, das die bei der Lachszucht im Meer verwendeten Netze wäscht, repariert und imprägniert; hier ist das Trocknen der imprägnierten Netze mit Heißluft in Trockentürmen am energieintensivsten.

Die Energieströme für die Aufwärm- und Abkühlprozesse vor einer Wärmeintegration zeigt Tabelle 1. Das Pisco-Unternehmen hat mit Abstand den größten Bedarf an Wär-



▲ **Abbildung 2: Warme und kalte Summenkurve des Industrieparks**

meenergie und das größte Angebot an Überschusswärme. Eine interne Wiederverwendung der Wärmeenergie durch ein Vorheizen des Weins mit der Wärme der Schlempe (Destillationsrückstand) ist jedoch aus Qualitätsvorgaben bei der Pisco-Produktion nicht möglich.

Der gesamte Wärmebedarf für die betrachteten kalten Prozessströme beträgt 2709 MJ/h (753 kWh/h) und der gesamte Kühlbedarf 2950 MJ/h (820 kWh/h). Die warme und kalte Summenkurve als Ergebnis der Pinch-Analyse ist in Abbildung 2 dargestellt, wobei ein Temperaturgradient ΔT_{\min} von 20 K angenommen wurde. Dieser hohe Wert wurde gewählt, um Wärmeverluste während des Transports zu berücksichtigen.

Der Pinch-Punkt für dieses Szenario ist bei 10°C für die kalten Ströme und bei 30°C für die warmen Ströme, womit sich insgesamt ein maximales Energieeinsparpotenzi-

al von 711 MJ/h (198 kWh/h) oder 22 % des gesamten Wärmebedarfs ergibt. Bei dieser thermodynamisch optimalen Prozessverschaltung könnten etwa 18 Liter Heizöl pro Stunde und 74 t CO₂ pro Jahr eingespart werden. Im Vergleich zu anderen Fällen ist die Wärmeintegration hier dadurch eingeschränkt, dass sich der Großteil der verfügbaren Wärmeenergie auf einem Temperaturniveau nur leicht oberhalb der Umgebungstemperatur befindet (Kühlen der Maische bei der Gärung).

Da alle drei Unternehmen einen beträchtlichen Wasserverbrauch mit unterschiedlichen Qualitätsanforderungen haben und das Lackier- und Fischereinetzunternehmen zudem größere Mengen an VOC emittieren, wurde ergänzend zur Pinch-Analyse für Wärmeströme ein Wasser- und VOC-Pinch durchgeführt. Hierdurch ergeben sich z. T. divergierende Ziele im Bereich der Energie- und Ressourceneffizienz, aber auch im Hinblick auf ökonomische Aspekte. Zur Unterstützung bei der Lösung dieses Entscheidungsproblems wurde im PepOn Projekt die "Multi Objective Pinch Analysis" (MOPA) entwickelt.

Kombinierter Ansatz: Multiple Objective Pinch Analysis (MOPA)

Sollen gleichzeitig Kosten sowie bspw. der Energie- und Wasserverbrauch minimiert und z. B. Emissionsgrenzwerte für VOC eingehalten werden, bieten sich Verfahren zur Mehrzielentscheidungsunterstützung an. Hierfür wurde die MOPA-Methode im Projekt entwickelt, bei der die Ergebnisse der

	Unternehmen	Eingangstemperatur [°C]	Ausgangstemperatur [°C]	Enthalpie-Differenz ΔH [MJ/h]	
Kälte Prozessströme	Fahrrad	20	90	234	Gesamter Wärmebedarf: 2709 [MJ/h]
	Fahrrad	90	125	118	
	Fahrrad	125	150	85	
	Fahrrad	150	155	17	
	Pisco	55	93	2.020	
	Fischereinetz	10	40	236	
Heiße Prozessströme	Fahrrad	155	150	17	Gesamter Kühlbedarf: 2950 [MJ/h]
	Fahrrad	150	40	371	
	Pisco	15	15	1.669	
	Pisco	22	15	518	
	Pisco	93	20	375	

▲ **Tabelle 1: Abkühl- und Aufwärm Schritte vor der Wärmeintegration**

Pinch-Analysen sowie weitere Entscheidungskriterien durch den Outranking-Ansatz PROMETHEE kombiniert werden [Geldermann et al. (2005)]. Beim verwendeten PROMETHEE-Ansatz werden sowohl die Stärken als auch die Schwächen einer Alternative berücksichtigt. Der Entscheider hat die Aufgabe, die Kriterien zu gewichten. Der Einfluss von Unsicherheiten bei den Prozessdaten und bei den Gewichtungen des Entscheiders wird durch Sensitivitätsanalysen und Monte-Carlo-Simulationen [Schollenberger et al. (2005)] analysiert. Neben der überbetrieblichen Prozessintegration lag der Schwerpunkt dieser Kombination von Mehrzielentscheidungsunterstützung und Pinch-Analysen auf der Auswahl von Produktionstechnologien mit minimalem Ressourcenverbrauch [Geldermann et al. (2006b)][Geldermann et al. (2006a)].

Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Pinch-Analyse hat ihren Ursprung in der thermodynamisch optimalen Verschaltung von Wärmeströmen zur Erhöhung der Energieeffizienz. Durch die Ausweitung auf Stoffströme wie z. B. Wasser und VOC und die Einbeziehung ökonomischer Daten sowie weiterer Faktoren wird sie zu einem wichtigen Analyseinstrument zur Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz auf betrieblicher und überbetrieblicher Ebene. Während jeder einzelne dieser Schritte eine lange Tradition im Ingenieurwesen hat, bietet ihre Kombination im Rahmen der Methode MOPA eine umfassendere Sichtweise.

Voraussetzung für eine wirtschaftliche Prozessintegration von Prozessen ist in der Regel eine starke räumliche Nähe. Deswegen ist gerade in wirtschaftlich dynamischen Ländern, die oft durch eine Vielzahl von neu entstehenden Industriegebieten gekennzeichnet sind, Prozessintegration ein wichtiger Ansatzpunkt zur Erhöhung der Energie- Ressourceneffizienz.

Die Aktivitäten des DFIU im Bereich der Pinch-Analyse, der Prozessintegration und Kooperation zwischen Unternehmen sollen weitergeführt werden. So ist bspw. die Erweiterung der Methode durch die Kombination mit einem geografischen Informations-

system (GIS) geplant, um für eine größere Gruppe von Unternehmen, etwa mehrere Industriegebiete, Aussagen zur optimalen Verschaltung und Ansiedlung neuer Unternehmen treffen zu können. Die charakteristischen Daten zum Energiebedarf sollen dabei in einem GIS-basierten Unternehmensinventar abgelegt und als Datenbank für die flächendeckende Ermittlung der Potenziale für Prozessverschaltung und Kreislaufschließung genutzt werden. Hierdurch soll das größte Hindernis für Kooperationen in bestehenden Industriegebieten, die hohen Investitionen und Wärmeverluste bei größeren Distanzen, durch frühzeitige Einbeziehung der Prozessintegration in die Planung deutlich verringert werden. Insbesondere in Regionen mit dynamischem Wachstum der Industrie und zahlreichen Neuansiedlungen erscheint eine gezielte Ansiedlungsplanung mit Hilfe der Pinch-Analyse aussichtsreich. Ein weiterer geplanter Forschungsschwerpunkt ist die Entwicklung geeigneter Kooperationsformen. So führt die Verschaltung von Prozessen unabhängiger Unternehmen zu zahlreichen Abhängigkeiten wie z. B. bei Betriebsunterbrechungen und Kapazitätsänderungen. Zudem ist eine sinnvolle Aufteilung der Investitionen für die Verschaltung und der Kosteneinsparungen durch die Effizienzerhöhung sowie der Risiken notwendig.

Literatur

Cerda, J., Westerberg, A., Manson, D., and Linnhoff, B.: Minimum utility usage in heat exchanger network synthesis - A transportation problem; *Chemical Engineering Science*; vol. 38; no. 3; pp. 373-387; 1983

Dunn, R. F. and El-Halwagi, M.: Optimal design of multicomponent VOC-condensation systems; *Journal of Hazardous Materials*; vol. 38; no. 1; pp. 187-206; 1994

Geldermann, J., Schollenberger, H., Treitz, M., Rentz, O.: Multi Objective Pinch Analysis (MOPA) for Integrated Process Design; Fleuren, H. A., Hertog, Dick, and Kort, Peter M.; *Operations Research Proceedings 2004*; 461-469; Heidelberg, Berlin: Springer, 2005

Geldermann, J., Treitz, M., Schollenberger, H., Ludwig, J., Rentz, O.: *Integrated Process Design for the Inter-Company Plant*

Layout Planning of Dynamic Mass Flow Networks; Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe; Final Report of the PepOn Project (2004-2006) for the VolkswagenStiftung, 2006a

Geldermann, J., Treitz, M., Schollenberger, H., and Rentz, O.: Evaluation of VOC recovery strategies: Multi Objective Pinch Analysis (MOPA) for the evaluation of VOC recovery strategies; *OR Spectrum*; vol. 28; no. 1; pp. 3-20; 2006b

Linnhoff, B., Manson, D., and Wardle, I.: Understanding heat exchanger networks; *Computers and Chemical Engineering*; vol. 3; pp. 295-302; 1979

Linnhoff, B. and Turner, J. A.: Heat-recovery networks: new insights yield big savings; *Chemical Engineering*; 1981

Mann, J. G., Liu, Y. A.: *Industrial Water Reuse and Wastewater Minimization*; New York: McGraw-Hill, 1999

Parthasarathy, G. and El-Halwagi, M.: Optimum mass integration strategies for condensation and allocation of multicomponent VOCs; *Chemical Engineering Science*; vol. 55; pp. 881-895; 2000

Schollenberger, H., Treitz, M., Geldermann, J., Rentz, O.: Multi Objective Pinch Analysis (MOPA) using PROMETHEE to Evaluate Resource Efficiency; Bremen; *Proceedings of the International Scientific Annual Conference Operations Research 2005*, 2005

Wang, Y. P. and Smith, R.: Wastewater Minimization; *Chemical Engineering Science*; vol. 49; no. 7; pp. 981-1006; 1994