



Optimierte Wärmeintegration

Hans SCHNITZER, Univ.-Doz.Dr., Jahrgang 1950. 1968 Beginn des Studiums Maschinenbau, später Wechsel auf Verfahrenstechnik an der Technischen Universität Graz. 1974 Diplom und anschließend Dissertation über mathematisches Modellierung biotechnischer Systeme. Später Konzentration auf Fragen des industriellen Energieeinsatzes und des Umweltschutzes, Ass. Prof am Institut für Verfahrenstechnik, Abteilung für Grundlagen der Verfahrenstechnik.

Bücher über Wärmepumpen (Springer 1983, Elsevier 1985), Stoff- und Wärmebilanzen (Vieweg 1990) und Wärmeintegration (dbv 1990).

Derzeitiger Arbeitsschwerpunkt ist neben der Energienutzung die abfallarme Produktion (Cleaner Technology) und die Umstellung verfahrenstechnischer Prozesse auf eine Kreislaufverträglichkeit.

Die hier vorgestellte Methode - bekannt als »PINCH-Technik« - zur Ermittlung des wirtschaftlich optimalen Grades an Wärmerückgewinnung in Produktionsbetrieben ermöglicht es, das wärmetechnische Verhalten der Gesamtanlage in einer Stufe zu analysieren. Hierdurch ist es möglich, die wirtschaftlichsten Varianten zur Wärmerückgewinnung sowie mögliche Einsatzpunkte von Kraft-Wärme-Kopplung, Wärmepumpe und Kaltdampfprozess zu analysieren. Besonders effektiv ist diese Methode, weil die Ermittlung des günstigsten Maßes an Wärmetausch vor der Auslegung der Apparate erfolgen kann. Außerdem erhält man im Zuge der Auswertungen Hinweise auf energetisch sinnvolle Prozessmodifikationen.

1. Das Problem

Für den Energietechniker stellt sich ein Produktionsprozeß vereinfacht wie folgt dar:

- Es gibt Stellen mit Wärmebedarf unterschiedlicher Größe auf verschiedenen Temperaturniveaus.
- Es gibt verfügbare Abwärme unterschiedlicher Größe auf verschiedenen Temperaturniveaus.
- Zur Beheizung stehen Energieträger (Öl, Gas, ...) und Heizmedien (z.B. Dampf auf verschiedenen Druckstufen) zur Verfügung.
- Zur Kühlung stehen Kühlmedien (Kühlwasser, Luft) zur Verfügung.
- Der Strombedarf ist möglichst wirtschaftlich zu decken.

Nimmt man vorerst diese Energiemengen als gegeben an, stellt sich eine Reihe von Fragen:

- Wie groß ist der theoretisch minimale Heiz-Energiebedarf für dieses Problem?
- Wie groß ist der theoretisch minimale Kühlmittelbedarf?
- Welche Wärmemenge kann theoretisch rückgewonnen werden?
- Was ist eine wirtschaftlich sinnvolle Größe für den Wärmerückgewinn und wie ändern sich dadurch Heiz- und Kühlmittelbedarf?
- Wie gestalte ich den Wärmetausch und wieviele Wärmetauscher benötige ich dafür minimal?
- Auf welchem Temperaturniveau muß ich beheizen bzw. ist eine Kraft-Wärme-Kopplung sinnvoll?

- Auf welchem Temperaturniveau muß ich kühlen bzw. läßt sich die Abwärme noch verwerten (Heizung, Stromerzeugung)?
 - Lassen sich Wärmepumpen integrieren, und wenn ja, dann wo?
- Auf all diese Fragen gibt die PINCH-

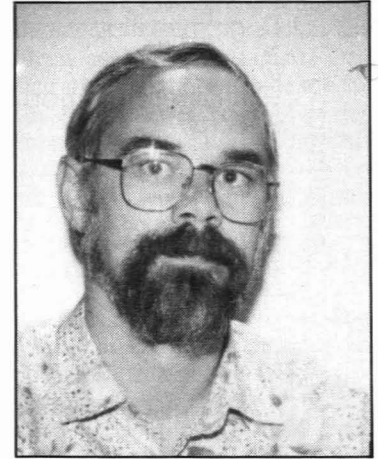
Strom	Anfangs-temperatur (°C)	Zieltemperatur (°C)	spez. Wärmefluß (kW/°C)
HI	150	60	2,0
H2	90	40	10,0
C1	20	150	2,5
C2	25	100	3,0

Tab. 1: Stromdaten für das Testbeispiel

Technik eine rasche Antwort, zusätzlich gibt sie Hilfestellung bei der Erstellung des günstigsten Wärmetauschernetzwerkes und bei der Analyse der Reaktion des Systems auf Änderungen bei einzelnen Parametern.

Die Grundlagen der Methoden werden im folgenden an den Daten eines Testbeispiels erläutert. In diesem Falle bestehen zwei Wärmeabnehmer (kalte Ströme, Wärmesenken) und zwei Abwärmeströme (heiße Ströme, Wärmequellen).

Generell werden alle Ströme, die gekühlt werden müssen, unabhängig von ihrer Temperatur als »heiß« bezeichnet und umgekehrt. Die Größe des Bedarfes wird durch den spezifi-



schon Wärmefluß [kW/grad] des betrachteten Stromes dargestellt.

2. Die Methode

Für die weiteren Berechnungen werden nun alle »heißen« bzw. »kalten« Ströme zu den jeweiligen »Superströmen« zusammengefaßt, indem in jedem Temperaturintervall die spezifischen Wärmeflüsse addiert werden (vgl. [1]). Diese Superströme werden dann in einem Temperatur-Wärmefluß-Diagramm aufgetragen (Abb. 1).

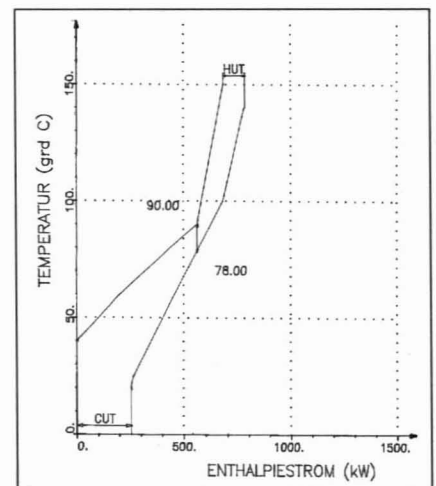


Abb. 1: Temperatur/Wärmefluß-Diagramm

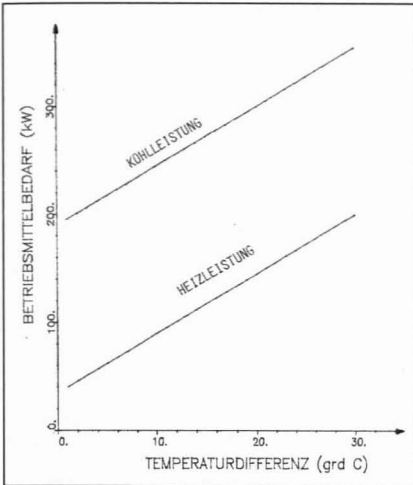


Abb. 2: Betriebsmittelbedarf bei variiertem Temperaturdifferenz

Da die Enthalpien nur Differenzwerte darstellen, die Temperaturen aber absolute Größe sind, lassen sich die beiden Linienzüge so gegeneinander verschieben, daß die »kalte Superkurve« überall unter der »heißen Superkurve« zu liegen kommt. Die Stelle, an der sich die beiden Kurven am stärksten annähern, nennt man den »PINCH«. Verschiebt man nun die beiden Kurvenzüge in horizontaler Richtung, ändert sich sowohl die Temperaturdifferenz und eventuell die Lage des Pinchpoint als auch die Größe des Heiz- und Kühlbedarfes (Abb. 2).

Für eine weitere Betrachtung kann das Problem am Pinchpoint geteilt werden. Die heiße und die kalte Seite können als selbständige Teilsysteme betrachtet werden, wobei

- das heiße System Wärmebedarf und
- das kalte System Wärmeüberschuß aufweist.

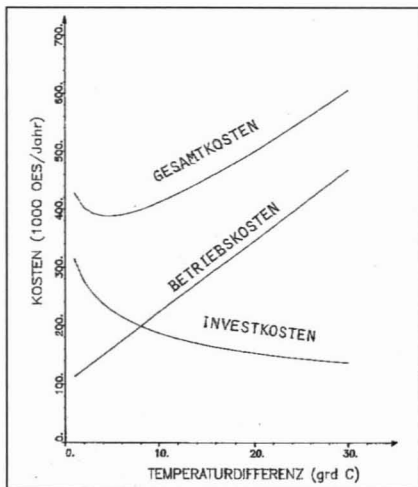


Abb. 3: Betriebs-, Invest- und Gesamtkosten bei variiertem Temperaturdifferenz

Aus dieser Tatsache heraus können die drei Grundsätze der Wärmeintegration formuliert werden:

- Kein Wärmetausch vom heißen auf das kalte Teilsystem,
- keine Kühlung im heißen System und
- keine Heizung im kalten System.

Aus der konsequenten Anwendung dieser Grundsätze erhält man auch die Bedingungen, daß Wärmepumpen nur quer über die Pinchtemperatur geschaltet werden dürfen und daß auch die Wärme aus Kraft-Wärme-Kopplungen nur über der Pinchtemperatur eingespeist werden darf.

3. Die Optimierung

Aus der rein thermodynamischen Analyse des Problems erhielt man den maximalen Grad an Wärmerückgewinn bzw. entsprechend den minimalen Heiz- und Kühlbedarf. Da in diesem Falle mindestens ein Wärmetauscher die örtlich minimale Temperaturdifferenz $T = 0^{\circ}\text{C}$ aufweist, wären diese Verhältnisse nur mit unendlich großen Wärmetauschern - und somit unendlich hohen Kosten - zu erreichen. Im anderen Extrem, kein Wärmetausch, bestehen zwar keine Kosten für Wärmetauscher, aber maximale Kosten für die Betriebsmittel Heizung und Kühlung.

Die Lage des Optimums für den Entwurf ist dann gegeben, wenn die Summe aus jährlichen Betriebskosten und annualisierten Investitionskosten ein Minimum ergeben (Abb. 3). Hierfür ist es notwendig, sowohl die Kosten der Betriebsmittel als auch spezifische Flächenkosten der Wärmetauscher zu kennen. Zur Grobauslegung der Flächen wird jeder der Ströme mit

einem für ihn typischen Wert für den Wärmeübergang gekennzeichnet. Die Kostenkurven in Abb. 3 sind im allgemeinen keine glatten Funktionen, sondern weisen Sprungstellen an den Stellen auf, wo sich die Anzahl der Wärmetauscher im Netzwerk ändert.

4. Retrofit und Neuplanung

In den seltensten Fällen wird es möglich sein, eine Anlage wärmetechnisch völlig neu zu konzipieren. In einer bestehenden Produktion ist man dagegen interessiert, die vorliegende Situation zu bewerten und Verbesserungsmöglichkeiten zu finden. Zu diesem Zweck kann die PINCH-Technik mit einigen zusätzlichen Konzepten ebenfalls angewandt werden (vgl. z.B. [2]).

Die Strategie, mit der man das Problem angeht, besteht aus zwei Stufen:

- Man berechnet mit den Prozeßdaten der Altanlage die Auslegungsziele für eine neue Anlage und vergleicht, wie weit man mit dem bestehenden Betriebsmittelverbrauch bei der bekannten installierten Wärmetauscherfläche von den Zielvorgaben abweicht und setzt dann die Auslegungsziele für die Verbesserungen fest.
- Man analysiert das bestehende Wärmetauschernetzwerk, stellt die Schwachstellen fest und versucht diese, unter weitgehender Ausnutzung der bestehenden Struktur, durch neue oder vergrößerte Wärmetauscher zu beseitigen.

Die Auslegungsziele werden ermittelt, wie dies im vorgehenden Abschnitt erklärt wurde. Diese Ergebnisse trägt man sodann in ein Energiebedarfs-Flächen-Diagramm (Abb. 4), in welches zusätzlich die Daten (Energiebedarf, installierte Wärmetauscherfläche;

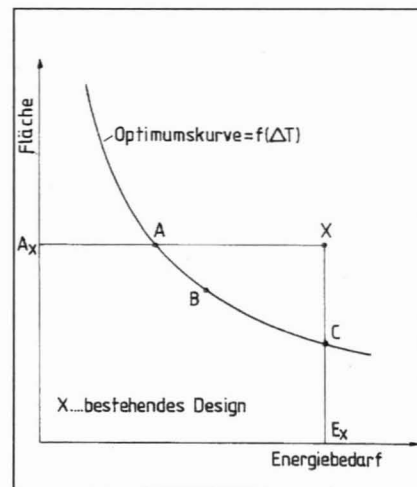


Abb. 4: Bewertung eines bestehenden Entwurfes mittels der Optimumskurve [1]

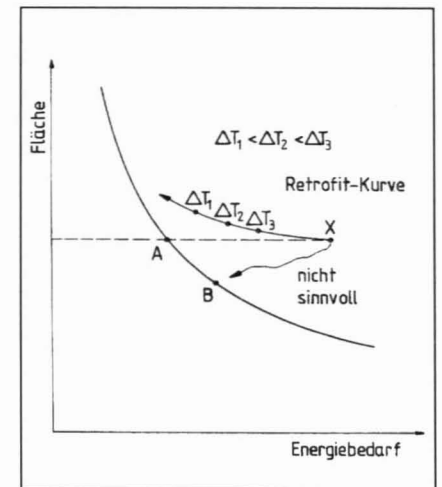


Abb. 5: Lösungsweg für Verbesserungen [1]

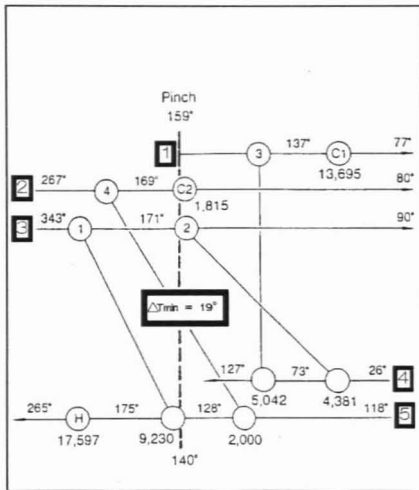


Abb. 6: Gitternetzschema

Pkt. X) der bestehenden Anlage eingetragen werden. Man ersieht nun, um welche Größe der Energiebedarf bei optimaler Anordnung der bestehenden Fläche verringert werden könnte (Strecke AX) bzw. wieviel Fläche bei bestehendem Energieverbrauch nutzlos installiert wurde (Strecke XC).

Änderungen durch neue Wärmetauscher und eventuell durch umgeordnete Flächen erbringen Ergebnisse entsprechend der Retrofit-Kurve in Abb. 5. Der Optimalpunkt A wird im allgemeinen wegen der existierenden Vorgaben aus der bestehenden Anlage nicht erreicht werden.

Zur Aussage darüber, welche Wärmetauscher im existierenden Entwurf schlecht integriert sind, ist es vorteilhaft, ein Gitternetzschema zu zeichnen (Abb. 6). Hierzu zeichnet man alle beteiligten Ströme entsprechend ihren Temperaturen in ein Diagramm, wobei die heißen Ströme um das gefundene, optimale T erniedrigt werden. Verbindet man nun die Ströme, die durch Wärmetausch in Verbindung stehen,

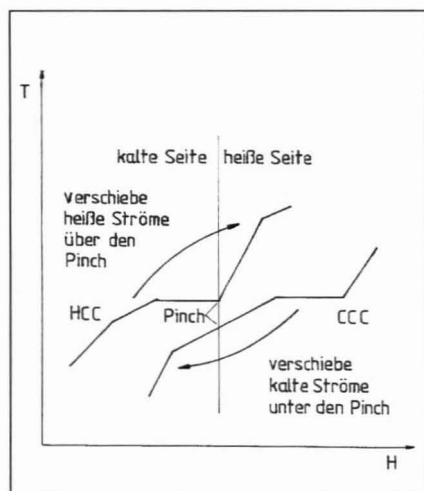


Abb. 7: Das Stromverschiebungsdiagramm

mit Linien, erhält man das Gitternetzschema. Linien, die stark von den Vertikalen abweichen oder sogar die Pinchtemperatur schneiden, kennzeichnen schlecht lokalisierte Wärmetauscher.

5. Prozeßmodifikation

Eine Analyse der Superkurven ergibt auch Hinweise für wärmetechnisch erwünschte Prozeßmodifikationen. Dieses Prinzip der Stromverschiebungen ist in Abb. 7 dargestellt. Grundsätzlich sollte versucht werden, heiße Ströme durch Veränderung der Prozeßparameter (z.B. den Betriebsdruck) über den Pinch nach oben zu verschieben und umgekehrt. Bei der Verschiebung von Strömen kann als Nebeneffekt auftreten, daß die PINCH-Temperatur ebenfalls verschoben oder gänzlich eliminiert wird.

Mit den neuen Prozeßgrößen muß natürlich die gesamte Ermittlung von Energiebedarf und Kosten neu durchgeführt werden, da sich die optimale Temperaturdifferenz für das Netzwerk geändert haben kann.

6. Erfahrungen und Beispiele

Mit der PINCH-Technik liegt eine Reihe von Erfahrungen verschiedenster Forschungs- und Ingenieurbüros vor, die zum Teil auch publiziert sind. Ausgehend von Problemen in der chemischen und petrochemischen Industrie, wo hauptsächlich kontinuierliche Prozesse mit großen Energieumsätzen bearbeitet wurden, gibt es immer mehr Erfahrungen mit Anlagen kleinerer Betriebe. Ein spezielles Problem, das aber auch behandelbar ist, sind Batchprozesse.

Vom Autor wurden in den letzten Jahren mit seinen Mitarbeitern Analysen in Raffinerien, in der chemischen Industrie, in der Lebensmittel- und Baustoffindustrie sowie in einigen

anderen Produktionen durchgeführt. Während diese Arbeiten durchwegs die Bewertung und mögliche Verbesserungen von bestehenden Anlagen behandelten, war eine Studie über die Wärmeintegration bei Ethanolanlagen auf einen optimierten Neuentwurf ausgelegt [3].

7. Danksagung

Die theoretischen Arbeiten auf dem Gebiet der Wärmeintegration an unserem Institut wurden durch einen Forschungsauftrag des Bundesministeriums für Wissenschaft und Forschung ermöglicht. Im Rahmen dieses Projektes wurde hauptsächlich die für die Analysen erforderliche umfangreiche Software erstellt und getestet. Eine Förderung des Steirischen Landesenergievereines gab uns die Möglichkeit, Methoden und Programme in fünf steirischen Industriebetrieben zu erproben.

Eine umfangreiche Darstellung der Methode sowie die Beschreibung der Programme und Berichte über die Fallstudien erschien als Bd. 3 der Grazer Schriftenreihe Verfahrenstechnik.

Der Autor möchte an dieser Stelle allen fördernden Institutionen danken.

Literatur:

- [1] Ferner H., Schnitzer H.; Die „PINCH“-Technik – Grundlagen, Potential, Grenzen. ÖIAZ 134 (1989) 2, 83–94.
- [2] Tjoe T. N., Linnhoff B.; Using Pinch Technology for Process Retrofit. Chem. Engng., April 28 (1986), 47–60.
- [3] Schnitzer H.; Heat Pump Integration to Ethanol Separation. Newsletter of the IEA Heat Pump Center, 7 (1989) 1, 24.
- [4] Ferner H., Schnitzer H.; Optimierte Wärmeintegration in Industriebetrieben. Grazer Schriftenreihe Verfahrenstechnik, Bd. 3, im Druck.

WERNER MÖRTH Ges.m.b.H.
WERBAGENTUR

A-8041 GRAZ, RAIFFEISENSTRASSE 118-120
TELEFON (0316) 46 55 19, TELEFAX 46 55 19-17
TELEX 31-2662