

Wärmenetze

K. Michalek

Zusammenfassung

Wärmenetze sind in das Bestreben, Energie- und Stoffwandlungskaskade optimal miteinander zu verknüpfen, einzuordnen. Sie sind in vielen Fällen die wirtschaftlichste Lösung auf dem Weg zu abprodukt- und abwärmefreien Technologien. Bei der Systemgestaltung muß dabei allerdings der Zusammenhang zwischen den Teilsystemen berücksichtigt werden.

Das Entwurfsproblem im engeren Sinne besteht in einer kostenoptimalen Kopplung von abzukühlenden (warmen) und aufzuwärmenden (kalten) Strömen. Die Art der Zielfunktion führt dabei im allgemeinen zu einer maximalen regenerativen Wärmenutzung mit minimaler äußerer Wärmez- und -abfuhr. Die Grundtendenz des optimalen Entwurfes ist durch die globale Realisierung des Gegenstromprinzipes geprägt.

Der in vielen Wärmenetzen auftretende Engpaß durch die geforderten Temperaturen „pinch“ begrenzt die regenerative Wärmenutzung und kann durch den Einsatz von Kreisprozessen oder gezielten Änderungen im Stoffwandlungssystem beeinflußt werden.

Die Kopplung an das äußere System und dessen Gestaltung bedarf gleichfalls einer Optimierung. Die „grand composite curve“ veranschaulicht die dabei anzustrebenden Verhältnisse.

Einige Teilprobleme, wie Steuerbarkeit und Flexibilität von Wärmenetzen bedürfen weiterer Untersuchungen. Während für die Optimierung der Regeneration thermody-

namische Methoden sehr anschaulich und leistungsfähig sind, scheint hier der Einsatz von wissensbasierten Algorithmen und Strukturparametermethoden aussichtsreich. In diesem Zusammenhang besteht ein Forschungs- und Entwicklungsbedarf besonders in Richtung der Anwendung auf Mehrproduktenanlagen und Batch-Prozesse.

Einordnung der Wärmenetze in Maßnahmen zur rationellen Energieverwendung

Die Wärmübertragung spielt insbesondere für Verfahren der stoffwandelnden Industrie, wie die chemische Industrie und die Metallurgie, und Verfahren der Energiewirtschaft eine außerordentliche Rolle. Diese Verfahren sind zum beträchtlichen Teil mit der Zufuhr, Umwandlung und Abfuhr thermischer Energien verbunden. Obwohl die Umwandlung dieser Energie, die Wärmeübertragung, aus energetischer Sicht oft ein nahezu verlustfreier Prozeß ist, treten beim notwendigen Triebkraftabbau ganz beträchtliche Verluste in der Umwandelbarkeit (Arbeitsfähigkeit) dieser Energieformen auf. Der dadurch hervorgerufene energetische Mehraufwand kann in der Größenordnung auf etwa die Hälfte der eingesetzten Energie geschätzt werden. Das zur wirtschaftlichen Disposition stehende Potential wird etwa die Hälfte des thermodynamisch vorhandenen Potentials ausmachen. Damit stehen hier Einsparmöglichkeiten zur Debatte, die bei heutigen Verhältnissen das Gesamtpotential der Nutzung alternativer Energien überschreiten. Dieses Potential ist nicht allein durch Wärmenetze zu erschließen. Diese stehen aber in engem Zusammenhang mit anderen Verfahren der rationellen Energieverwendung und leisten bereits heute einen beträchtlichen Beitrag zu energiesparenden, „sustainable“ Technologien.

Bei der Erklärung der Zusammenhänge muß man sich von einer nur auf Energiebilanzen (1. Hauptsatz der Thermodynamik) beruhenden Betrachtung des Energieeinsatzes trennen. Es sind außerdem die unterschiedlichen Qualitäten der Energieträger hinsichtlich ihrer Umwandelbarkeit (2. Hauptsatz der Thermodynamik) zu beachten. Die Exergie ist zur zusammenfassenden Quantifizierung der Aussagen beider Hauptsätze inform des Ausweises des maximal unbegrenzt umwandelbaren Anteils einer Energie (Umrechnung in mechanische oder elektrische Energie) geeignet [1].

Die qualitative Darstellung der Zusammenhänge geht aus *Bild 1* hervor [2]. Dabei ist die zu übertragende Energie als ΔW und der Faktor der Umwandelbarkeit (exergetische Temperatur) als τ_e bezeichnet. Die eingesetzte Exergie ergibt sich somit als Produkt dieser Größen oder als Fläche im Diagramm.

$$\Delta E = \int \tau_e * d\Delta W$$

Die Triebkraft τ_e kann im günstigsten Falle Null werden. Das erfordert eine gute Anpassung zwischen der Stoffwandlungskaskade - die die eigentliche Zielstellung des Verfahrens repräsentiert - und der Energiewandlungskaskade - die über Hilfsprozesse die benötigten Energien bereitstellt. Diese Anpassung ist die Aufgabe der Wärmenetze. Sie dienen der gekoppelten Wärmez- und -abfuhr in den Verfahren.

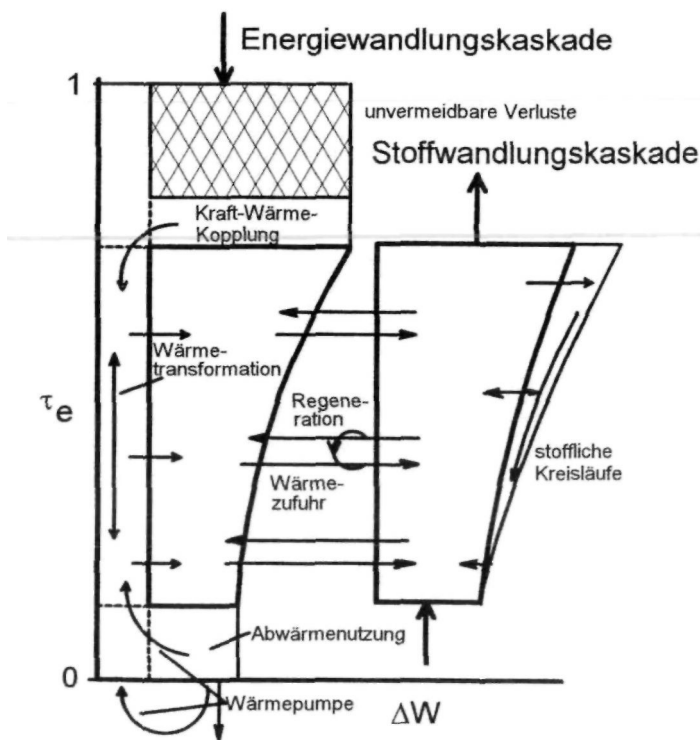


Bild 1: Verknüpfung von Energiewandlungs- und Stoffwandlungskaskade zur Minimierung der Verluste und des Energiebedarfes

Bei günstiger Kopplung entsteht ein Kreislauf ohne zusätzlichen Energiebedarf - die Regeneration. Eine solche günstige Kopplung ist allerdings nur möglich, wenn die Stoff- und Energiewandlungskaskade so gestaltet werden, daß ihre beiden Kurvenverläufe verlustlos zueinander passen.

Die Bezeichnung „Kaskade“ wurde dabei gewählt, um hervorzuheben, daß auch in diesen Teilbereichen ein stufenweiser Triebkraftabbau bei günstiger Prozeßgestaltung zu

geringen Verlusten führt. Der gezeichnete Grenzfall ohne Abprodukte und Abwärmen ist allerdings wirtschaftlich nicht erreichbar. An den angedeuteten Kreisläufen in der Stoffwandlungskaskade wird deutlich, daß über Reaktionswege, Stofftrennverfahren und Stoffkreisläufe ähnliche Gestaltungsmöglichkeiten bestehen, wie sie in der Energiewandlungskaskade näher ausgeführt sind.

In der Energiewandlungskaskade sind unvermeidbare Verluste eingetragen. Diese betreffen eine angenommene Wärme- und Elektroenergiebereitstellung über die Verbrennung fossiler Brennstoffe. Sie werden dadurch hervorgerufen, daß die - im Prinzip reine Exergie darstellende - Energie der Brennstoffe in die nur begrenzt umwandelbare thermische Energie der Rauchgase verwandelt wird (ein Beispiel der besseren Nutzung stellt die Brennstoffzelle dar). Die dadurch hervorgerufene Entropieproduktion fordert letztendlich eine Wärmeabfuhr und bewirkt, daß eine Energieversorgung ohne Abwärme nur unter besonderen Anpassungsbedingungen möglich ist. Die Zielstellung besteht deshalb darin, die Wärmeabgabe nicht völlig zu vermeiden, sondern die anfallende Wärme zu nutzen und sie soweit abzuarbeiten, daß ihre Abgabeparameter dem Umgebungszustand entsprechen (Exergie gleich Null). Die Kraft-Wärme-Kopplung, Wärmetransformationsprozesse (die im höheren Temperaturbereich technisch zur Zeit nicht zur Verfügung stehen) und Wärmepumpen erlauben eine bedarfsgerechte Bereitstellung von mechanischer oder elektrischer und thermischer Energie. Eine gute Anpassung liefert günstige Voraussetzungen für die regenerative Wärmeübertragung und damit die Wärmenetze.

Von den angeführten Möglichkeiten der Gestaltung einer „sustainable“ Technologie ist die optimale Gestaltung der Wärmenetze bisher am breitesten angewandt worden, weil sie bei einer Reihe von Großverfahren der Chemischen Industrie, insbesondere der Erdölverarbeitung auf günstige Realisierungsmöglichkeiten und große, auch wirtschaftliche, Einsparpotentiale stieß. Die Kostenvorteile sind so entscheidend, daß Untersuchungen zum Wärmepumpen- oder Wärmetransformatoreinsatz im allgemeinen Voruntersuchungen zu Wärmenetzen erfordern. Erst im durch Wärmenetze nicht mehr erreichbaren Bereich haben die anderen Prozesse wirtschaftliche Realisierungschancen [3].

Andererseits liefern alle bisher besprochenen Prozesse Randbedingungen für die Gestaltung des Wärmeübertragernetzwerkes. Daraus wird deutlich, daß der Entwurfsprozeß im allgemeinen mehrstufig und iterativ abläuft. Die ersten Annahmen im

Entwurfsprozeß werden dabei in einer Reihenfolge festgelegt, die durch die Zielstellung der Technologie, unterschiedlichen Freiheitsgrade der Systeme und unterschiedliche Schwierigkeiten bei deren Entwurf hervorgerufen wird. Im Prinzip geht der Weg von der Stoffwandlungskaskade über das Wärmenetz zur Energiewandlungskaskade. Zuerst werden die chemischen Reaktionen, dann die Stofftrennprozesse, dann die Wärmeübertragernetzwerke und zum Schluß die Bereitstellung von Heiz- und Kühlmitteln bestimmt [4].

Weitere Komplikationen ergeben sich durch unterschiedliche Ganglinien für Wärmebedarf und Wärmeangebot und die räumliche Trennung von Wärmequellen und Senken. Hierzu sind im Entwurfsprozeß im allgemeinen gesonderte Untersuchungen notwendig

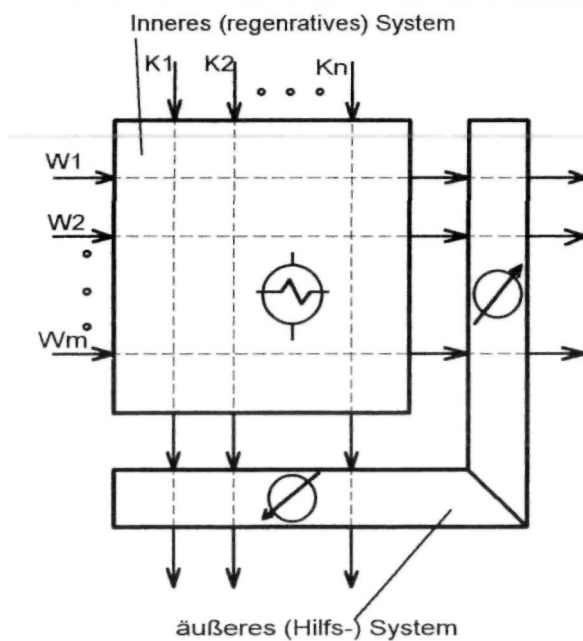
Diese Betrachtungen sind besonders für Mehrproduktenanlagen und Batch-Prozesse recht komplex. Diese Anlagen weisen auch Besonderheiten hinsichtlich der Kostenfunktion aus. Allgemeine Betrachtungen liefern folgende Lage des Kostenminimums

$$\Delta E_{v,opt} = \sqrt{\frac{k_{ef} * z}{k_e * \tau_b}} * \Delta E_{rev}$$

Kennzeichnung des Entwurfsproblems

Das Entwurfsproblem besteht in einer optimalen Kopplung von m abzukühlenden (warmen) mit n aufzuwärmenden (kalten) Strömen. Dabei sind im allgemeinen die Arten der Stoffströme (Zusammensetzung, thermodynamische Zustandsfunktionen, Stoffdaten) ihre Mengen (Massen- oder Komponentenströme, zu übertragende Wärmen) und Temperaturbereiche (geforderte Eintritts- und Austrittstemperaturen) mit unterschiedlicher Schärfe bekannt.

Die Mindestangaben für das Entwurfsproblem bestehen in der Kenntnis der zu übertragenden Wärmeströme und der geforderten Temperaturen. Häufig wird die zu übertragende Wärme linear auf den Temperaturbereich aufgeteilt. Das ist für die meisten Fälle eine gute Näherung und entspricht einer Rechnung mit konstanten



mittleren spezifischen Wärmekapazitäten, einer Verdampfung oder Kondensation eines reinen Stoffes oder einfachen Näherungen für die Verdampfung oder Kondensation von Mehrstoffgemischen.

Die Vorgaben werden für das Entwurfsproblem als exakt, also „scharf“, angenommen.

Die Kenntnis unterschiedlicher Fahrweisen oder Unterschiede zwischen exakt und nur näherungsweise einzuhaltenden Temperaturen wird im eigentlichen Entwurfsprozeß des Wärmenetzes im allgemeinen nicht beachtet. Hierzu sind übergeordnete Untersuchungen notwendig [5].

Bild 2: Darstellung des Entwurfsproblems für Wärmeübertragernetzwerke und seine Aufteilung in ein regeneratives System und ein Hilfssystem zur Wärmezu- und -abfuhr

Eine schematische Betrachtung des Entwurfsproblems geht aus *Bild 2*

hervor [6]. Die Lösung des Problems besteht im Entwurf der regenerativen Kopplungen der warmen und kalten Ströme im sogenannten „inneren“ System. Die Festlegung und Dimensionierung dieser Kopplungen bedeutet in vielen Fällen die Lösung der eigentlichen Entwurfsaufgabe. Das Festlegen einer Kopplung erfordert die Bilanzierung der aufzunehmenden und abzugebenden Wärmen und der bei der Wärmeübertragung auftretenden Temperaturen. Dabei ist wenigstens eine minimale Temperaturdifferenz zwischen der warmen und kalten Seite der Wärmeübertrager einzuhalten.

Unter den günstigsten Bedingungen sind dafür mindestens $m + n - 1$ Kopplungen notwendig [7]. In den meisten Fällen werden für die Gestaltung des inneren Systems zur Anpassung an die Triebkraftverhältnisse und zur Erreichung einer möglichst großen regenerativen Wärmeübertragung mehr „Kopplungseinheiten“ benötigt. Die angelegte Matrix erweckt den Anschein, als ob im inneren System eine einmalige Kopplung der Ströme erfolgen würde. In vielen Fällen kann man auf diese Art das Optimum nicht erreichen und es sind mehrfache Kopplungen, also Rückführungen, notwendig.

Nach der regenerativen Wärmeübertragung werden die Ströme im äußeren System durch Heiz- und Kühlströme auf das benötigte Temperaturniveau gebracht. In vielen Fällen ist es richtig von einer Schlußkühlung oder -erwärmung zu sprechen, weil die Temperaturen der äußeren Kühlmittel oder Heizmittel im Vergleich zu den Strömen des inneren Systems extreme Temperaturen aufweisen. In anderen Fällen sind diese Prozesse sinnvollerweise zwischenschalten. In diesen Fällen sind sie beim Systementwurf des inneren Systems zu berücksichtigen. Dies kann durch die direkte Einbeziehung in den Entwurfsalgorithmus [8] oder durch eine übergeordnete Analyse des t, Q -Diagrammes [9] erfolgen.

Die Zielfunktion für den optimalen Entwurf besteht im allgemeinen in minimalen Gesamtkosten [5] oder bei der Reoptimierung von Anlagen außerdem in der Einhaltung von Amortisationszeiten [4]. Das heißt die Zielfunktion ist betriebswirtschaftlicher Natur und beinhaltet sowohl die Kosten für Energieträger und Kühlmittel als auch die Investitionskosten. Bei einigen Synthesestrategien wird dies nicht explizit ausgewiesen. Das ist wegen des prinzipiellen Kostenverlaufes möglich.

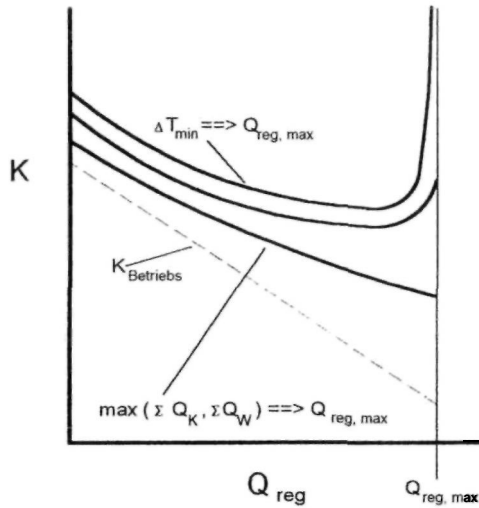


Bild 3: Zusammenhang zwischen der im inneren System regenerativ übertragenen Wärme und den jährlichen Gesamtkosten für Zu- und Abfuhr thermischer Energie.

Die grundsätzlichen Zusammenhänge sind in *Bild 3* dargestellt. Hier sind mögliche Kostenverlaufskurven qualitativ in Abhängigkeit von der im inneren System übertragenen Wärme dargestellt. Es wird angenommen, daß für jede der übertragenen Wärmemengen eine optimale Realisierung des Wärmenetzes erfolgte. Das bedeutet, analog der zu *Bild 1* angestellten Überlegungen, eine Kopplung zwischen warmer und kalter Seite im Gegenstrom.

Das Maximum der im inneren System regenerativ übertragbaren Wärme ergibt sich entweder durch die Energiebilanz (Vergleich der geforderten

Wärmeabgabe mit der geforderten Erwärmung) oder durch den 2. Hauptsatz der Thermodynamik (die Temperatur der wärmeabgebenden Seite muß höher sein als die Temperatur der wärmeaufnehmenden Seite). Eine Zunahme der regenerativen Wärmeübertragung führt zu einer Abnahme von äußerer Wärmezu- und -abfuhr und damit zu sinkenden Betriebskosten. Im allgemeinen müssen dafür aber zusätzliche Flächen in regenerativen Wärmeübertragern installiert werden, was zu einer Zunahme der Investitionskosten führt.

Die untere Kurve stellt ein Problem dar, bei dem sich die Grenzen der Regeneration durch die Energiebilanz ergeben und zwischen den Kaskaden der kalten und warmen Ströme relativ große Triebkräfte existieren. In diesem Falle ist das betriebswirtschaftliche Optimum mit dem thermodynamischen Grenzwert identisch. In der zweiten Kurve bestimmt zwar auch die Energiebilanz die erreichbare Regeneration, durch geringere Triebkräfte ist aber ein beträchtlicher zusätzlicher Investitionsaufwand notwendig, so daß das Kostenminimum nicht beim thermodynamisch erreichbaren Grenzwert liegt (aber doch nahe daran). Die obere Kurve (typisch für „pinch point“,

s.u.) verschärft diese Aussage noch insofern, als beim thermodynamischen Grenzwert (hier sind die Triebkräfte Null geworden) die Kosten nach unendlich gehen.

Die Kostenverläufe sind für typische Anlagen der stoffwandelnden Grundstoffindustrie so eng an den Grenzwert angeschmiegt, daß er mit einem kleinen Korrektiv direkt als Optimierungsziel („target“ [4]) angenommen werden kann. Das Korrektiv besteht in der Vorgabe einer geforderten minimalen Temperaturdifferenz (etwa 5 bis 10 K), die in einer abschätzenden oder iterativen Kostenrechnung noch genauer bestimmt werden kann („supertargeting“). Diese Eigenschaften der Zielfunktion sind die eigentliche Ursache für die Dominanz thermodynamischer Methoden beim praktischen Systementwurf.

Die Aufgabe der Gestaltung des inneren Systems läuft bei Kenntnis der darin zu übertragenden Wärmen im wesentlichen auf eine Minimierung der Investitionskosten hinaus. Bei der Reoptimierung bestehender Systeme ergeben sich nicht nur im energetischen Bereich, sondern auch im Bereich der Investitionskosten häufig Reserven.

Bei einfachen flächenproportionalen Ansätzen für die Wärmeübertrager folgt damit eine Minimierung der Wärmeübertragerflächen, was bei Vernachlässigung von Unterschieden in den Wärmeübergangskoeffizienten zu einer Triebkraftmaximierung und damit einer konsequenten Anwendung des Gegenstromprinzipes führt [10].

Verschiedene Methoden zur Lösung des Entwurfsproblems erlauben auch die Berücksichtigung der Wärmeübergangskoeffizienten in der Zielfunktion oder sogar einer Wärmeübertragerauslegung [8]. Die Auswirkungen auf die Zielfunktion sind allerdings relativ gering im Vergleich zu anderen Gesichtspunkten (z.B. technologischen), die in der Zielfunktion nicht berücksichtigt sind [11].

Das reine Gegenstromprinzip führt bei einigen Anlagen (z.B. Erdöldestillation), wo einige Zehn kalter und warmer Ströme miteinander zu koppeln sind, zu komplexen, technisch kaum beherrschbaren Strukturen, deren Flächenvorteile im Vergleich zu wesentlich einfacheren Strukturen gering sind. Eine genauere Modellierung der Wärmeübertragerkosten als degressive Funktion der Fläche führt dahingegen zu einfacheren Strukturen. Diese Zielfunktion erfordert aber den Einsatz nichtlinearer Optimierungsverfahren oder von Evolutionsstrategien, wobei die Erreichung des globalen Optimums im allgemeinen nicht garantiert werden kann. Beim genauen Entwurf ist außerdem zu beachten, daß die ausgewiesenen „Kopplungseinheiten“

nicht mit den „Wärmeübertragereinheiten“ identisch sein müssen. Bei großen Anlagen werden Wärmeübertragergruppen eingesetzt

Die Wechselwirkung zwischen den Druckverlusten im Wärmeübertrager und den Wärmeübergangskoeffizienten wird im allgemeinen in einer niederen Entwurfsebene behandelt, ist aber prinzipiell in das Entwurfsproblem einbeziehbar [4, 8]. Hier handelt es sich um ein Optimierungsproblem zwischen Exergieverlusten durch Druckverlust, Exergieverlusten durch endliches Temperaturgefälle und Investitionskosten des Wärmeübertragers [1]. Die Auswirkungen für den Entwurf des inneren Systems sind im allgemeinen unbedeutend.

Die Aufstellungskosten und Kosten für die Rohrleitungsführung müßten außerdem in die betriebswirtschaftliche Zielfunktion aufgenommen werden. Im allgemeinen geht man jedoch davon aus, daß der Systementwurf diese Größen nicht signifikant beeinflusst. Technisch sehr wesentliche Eigenschaften von Wärmenetzen, wie Sicherheit, Zuverlässigkeit, Flexibilität und Steuerbarkeit, werden für die Zielfunktion als Imponderabilien behandelt. Sie erfordern zusätzliche Bearbeitungsschritte, normalerweise im Dialog zwischen Computer und Ingenieur, da oft eine Reihe von Strukturen existieren, die sich hinsichtlich der Zielfunktionswerte nur geringfügig, hinsichtlich der technischen Eigenschaften aber wesentlich unterscheiden.

Lösung des Entwurfsproblems

Die Vielfalt der Veröffentlichungen zu diesem Problemkreis (bis heute ca. 250) legen eine Klassifizierung nahe.

Eine mögliche Einteilung kann nach den verwendeten Zielfunktionen vorgenommen werden [5]. Als Zielfunktionen sind die Minimierung des Energiebedarfes, die Minimierung der Wärmeübertragerfläche, die Minimierung der Anzahl der Kopplungseinheiten und die Jahreskosten verwendet wurden. Der Zusammenhang dieser Zielfunktionen ist im vorigen Abschnitt bis auf die Minimierung der Anzahl der Kopplungseinheiten herausgearbeitet worden.

Aus den thermodynamischen Überlegungen und der degressiven Kostenfunktion ist ein Kompromiß zwischen Gegenstromprinzip und Komplexität zu erwarten. Das Problem besteht darin, daß der Zusammenhang zwischen Struktur der Schaltung und

Auslegung der Kopplungen nicht konvex ist. Das Optimum kann durch Evolution komplexer Strukturen zu einfachen [11, 12] oder die Entwicklung komplexerer Strukturen aus einfachen erreicht werden [13]. Die einfachste Struktur, die die geforderte Wärme im inneren System überträgt, ist in diesem Zusammenhang als Zwischenschritt zur optimalen Struktur anzusehen, von dem man erwartet, daß er als Startpunkt zu den günstigsten Strukturen führt.

Die methodischen Konzepte zur Lösung des Problems [5] können in thermodynamische [4], mathematische [13] und wissensbasierte [14] Konzepte unterschieden werden.

Die thermodynamischen und wissensbasierten Konzepte nutzen die schon diskutierten Eigenschaften des Entwurfsproblems und bekannte Strategien zu ihrer Lösung aus.

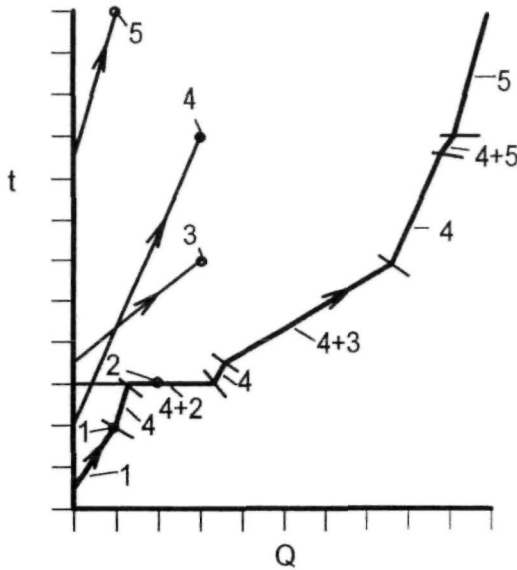
Die mathematischen Konzepte formulieren das Optimierungsproblem durch vereinfachende Annahmen als lineares Transportoptimierungsproblem (LP) und optimieren gegebenenfalls den Zusammenhang zwischen Struktur und Wärmeübertragerauslegung durch Strukturparametermethoden, gemischtganzzahlige Optimierung (MILP - mixed integer linear programming), und anschließenden Einsatz nichtlinearer Optimierungsverfahren (NLP).

Im Prinzip ergänzen sich diese Methoden. Die thermodynamische Methode wird im folgenden deshalb ausführlicher behandelt, weil sie das Verständnis der Problemstellung und des Zusammenhanges zur rationellen Energieverwendung erleichtert.

Das t,Q-Diagramm liefert einen Überblick über die Wärmeübertragungssituation und ist schon in der Vergangenheit als graphisches Verfahren zur Lösung von Wärmeübertragungsproblemen benutzt worden [15].

Die Erstellung des Diagrammes, das nach Linnhoff „composite curve“ bezeichnet wird, ist in *Bild 4* dargestellt. Die Ströme 1 bis 5 stellen als Beispiele kalte, zu erwärmende Ströme (das geht aus der Pfeilrichtung hervor) mit unterschiedlichen Temperaturbereichen und unterschiedlichen zu übertragenden Wärmen dar. Die Ströme 1 und 2 werden von der nachträglich gezeichneten Summenkurve überdeckt und sind noch durch die gezeichneten Endpunkte identifizierbar. Der waagerechte Verlauf von Strom 2 ($t = \text{const}$) weist auf die Verdampfung eines reinen Stoffes hin. Der Anstieg im t,Q-Diagramm entspricht $m \cdot c_p$, was bei $c_p = \text{const}$ zu Geraden führt. Für die Summenkurve werden, ausgehend von der niedrigsten Temperatur, die

von den Strömen zu übertragenden Wärmen zusammengezählt. In Temperaturbereichen ohne Wärmeübertragung läuft die Kurve parallel zur t-Achse.



Man erhält so zwei Pseudoströme [15] - warm und kalt - für die die günstigsten Wärmeübertragungsbedingungen zu ermitteln sind. Diese Pseudoströme weisen dort, wo neue Ströme im Temperaturbereich auftreten oder alte verschwinden, Knickpunkte auf, die im Beispiel gekennzeichnet sind. An die Summenkurve des Beispiels ist außerdem noch angetragen, aus welchen Originalströmen ihre einzelnen Abschnitte bestehen. Ähnliche Darstellungen sind auch über Temperatur-Wärmeinhalts-

Bild 4: Erstellung der Summenkurve der zu übertragenden Wärmen für die kalten bzw. warmen Ströme („composite curve“) im t,Q-Diagramm als Flächen darstellen für die

Bilanzierung nicht so geeignet sind, aber eine leichtere Darstellung und Einzeichnung erzeugter Wärmeübertragerstrukturen erlauben [10, 16].

Die Zusammenführung der Summenkurven für kalte und warme Ströme im t,Q-Diagramm verdeutlicht das Entwurfsproblem (Bild 5). Im Beispiel ist der Wärmebedarf größer als die mögliche Wärmeabgabe, so daß eine äußere Wärmezufuhr unbedingt notwendig ist. Eine verlustfreie Wärmezufuhr beim benötigten Temperaturniveau würde den Einsatz von Rechtsprozessen erfordern. Eine technische Annäherung kann durch Kraft-Wärme-Kopplung oder Gasturbinen mit Abwärmenutzung erfolgen. Notwendige Exergien oder auftretende Exergieverluste können im Diagramm direkt als Flächen dargestellt werden, wenn der Temperaturmaßstab (über die absolute Temperatur und die Umgebungstemperatur) in eine exergetische Temperatur umgerechnet wird.

$$\tau_e = \frac{T - T_u}{T}$$

Das verursacht im Diagramm Kurven anstatt der eingezeichneten Geraden. Außerdem können Flächen weniger anschaulich verglichen werden als Abstände. Deshalb hat sich diese Diagrammform nicht durchgesetzt. Qualitativ sind die Grundtendenzen auch im t, Q -Diagramm ablesbar.

Der kleine Anteil von Rechtsprozessen bei hohen Temperaturen zwischen warmen und kalten Strömen im Beispiel weist auf ein prinzipiell nutzbares Gefälle hin. Da

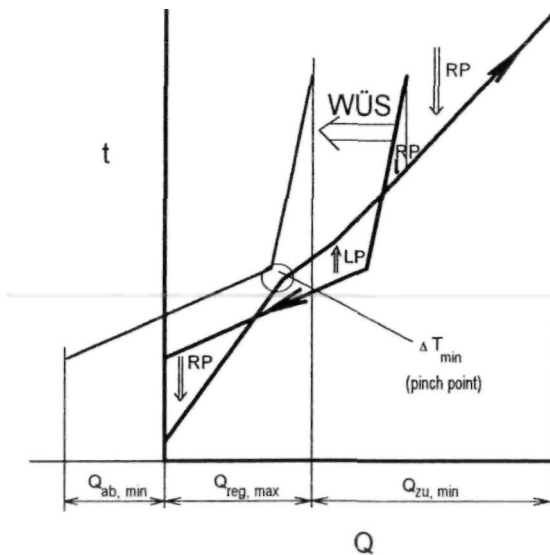


Bild5: Beispiel für ein Entwurfsproblem im t, Q -Diagramm, das bei reiner Wärmeübertragung einen „pinch point“ aufweist und bei vorgegebenem ΔT_{\min} die im inneren System maximal regenerativ übertragbare Wärme und die minimal notwendige Wärmeabfuhr und -zufuhr des äußeren Systems ausweist.

temperaturbereiche keine Arbeitsmittel zur Verfügung stehen. Nach einer groben Schätzung (unter der Annahme, daß Elektroenergie durch eine brennstofforientierte Energiewirtschaft und zusätzlicher Wärmebedarf über Verbrennung bereitgestellt wird), dürfte die zwischen den beiden Kurven im t_e, Q -Diagramm liegende Fläche maximal ein Fünftel der zusätzlich regenerativ nutzbaren Wärme betragen. Das führt

diese Prozesse aber mit mehreren Wärmeübertragungsprozessen verbunden sind und außerdem noch verlustbehaftete Arbeitsmaschinen mit zusätzlichen Investitionskosten beinhalten, ist ein solcher Einsatz auf Sonderfälle beschränkt.

Im mittleren Bereich des Beispiels ist eine Wärmeübertragung von den warmen zu den kalten Strömen nicht gewährleistet, weil keine positiven Triebkräfte zur Verfügung stehen. Diese Triebkräfte können prinzipiell über Linksprozesse (Wärmepumpen) bereitgestellt werden. Diese Prozesse sind aber selbst wieder verlustbehaftet. Außerdem

treten oft technische Schwierigkeiten auf, weil für die geforderten

zu Bedingungen, die einen Wärmepumpeneinsatz nur unter besonderen Voraussetzungen wahrscheinlich erscheinen lassen.

Für die Rechtsprozesse im unteren Bereich des Beispiels gilt ähnliches wie für Prozesse im oberen Bereich zwischen den beiden Summenkurven. Für große Abwärmemengen sind allerdings technisch und wirtschaftlich sinnvolle Lösungen bekannt.

Damit liegt ein Schwerpunkt technischer Lösungen in der Ausnutzung der Kraft-Wärme-Kopplung bei der äußeren Wärmezufuhr. Die günstigen Effekte der möglichen Kreisprozesse versucht man meist in übergeordneten Stufen des Entwurfsprozesses mit Eingriffen in die Stoffwandlungskaskade zu erreichen. Dabei benutzt man die Stoffwandlungsprozesse wie Kreisprozesse und legt ihre Parameter so fest, daß Wärmezu- und -abfuhr in günstigen Bereichen liegen.

Aus der Komplexität der Betrachtungen wird deutlich, daß es technisch sinnvoll ist das Wärmeübertragungsproblem dekomponiert zu behandeln und in dieser Entwurfsstufe auf die reine Wärmeübertragung zu beschränken.

Die günstigsten Verhältnisse für den Flächenbedarf und die Energieausnutzung bei den vorgegebenen Pseudoströmen erhält man durch Realisierung des Gegenstromprinzips. Dazu sind die warmen Ströme nach links soweit zu verschieben, daß sich an allen Stellen der Kurven positive Triebkräfte ergeben. Die Forderung nach einem AT_{min} begrenzt die mögliche Regeneration in Form eines „pinch point“ und wirkt auf das Wärmeübertragungssystem wie ein Engpaß. Das AT_{min} selbst kann über vorgelegte Optimierungsrechnungen als „supertarget“ [4] bestimmt oder über Iterationen optimiert werden. Oft arbeitet man mit Erfahrungswerten.

Nicht alle Probleme haben einen „pinch“, was in der Diskussion zu Bild 3 angedeutet wurde, und manche Probleme haben mehrere. Es ist das Verdienst von B. Linnhoff um die Eigenschaften des „pinches“ und die Lage von Prozessen zum „pinch“ eine ganze Entwurfsphilosophie gegründet zu haben, die er „pinch technology“ nennt. Die aus dem t,Q-Diagramm abgeleiteten Zielstellungen hinsichtlich äußerer Wärmezu- und -abfuhr heißen bei ihm „target“, die durch die realisierte Entwurfsprozedur zu erreichen sind.

In der rechen-technischen Umsetzung dient das t,Q-Diagramm im wesentlichen der Veranschaulichung und Bewertung. Die „pinch“ und die Extremwerte für Regeneration und Wärmezu- und -abfuhr lassen sich z.B. auch durch Methoden der linearen Transportoptimierung (Spezialfall ist das Zuordnungsproblem [11, 16]) finden. Für

den Entwurf hat Linnhoff [17] z.B. Tabellen (PTA - process table algorithm) vorgeschlagen.

Der Zusammenhang zwischen den Pseudoströmen und den Originalströmen ist in Bild 4 sichtbar geworden. Das flächenminimale Netzwerk (unter Vernachlässigung der Unterschiede in den Wärmeübergangskoeffizienten) kann nun erhalten werden, indem man die Verhältnisse der Pseudokurven exakt auf die Originalströme überträgt. Die Kopplung und Zuordnung der Ströme erfolgt für die verschobenen Kurven im t,Q -Diagramm senkrecht. Abweichungen davon bezeichnet Linnhoff als „criss cross“, der zu vermeiden ist, weil er zu höheren Wärmeübertragerflächen und im schlimmeren Fall zur Nichterreichung der Ziele hinsichtlich Regeneration führt.

Solche Zuordnungen sind durch Stromaufspaltungen immer zu erreichen [11], führen aber häufig zu Strukturen, die keine technischen Realisierungschancen haben. Deshalb sind Synthesgorithmen anzuwenden, die zu realisierbaren Strukturen mit größeren Wärmeübertragereinheiten führen und aus Gründen der Kostendegression und der anlagentechnischen Realisierung optimal sind.

Für das Gebiet des „pinch“ als Engpaß gestaltet sich das Problem besonders schwierig. In anderen Gebieten sind die Triebkräfte relativ groß, so daß die Unterschiede zwischen Gegen- und Gleichstrom nicht mehr entscheidend sind und besonders einfache Strukturen erzeugt werden können. Außerdem ist zu beachten, daß technische Wärmeübertrager im allgemeinen keinen reinen Gegenstrom realisieren, was zu Fehlern in der Zielfunktion führen kann [18].

Diese Probleme führen dazu, daß man oft das Gesamtproblem ausgehend vom „pinch“ in Teilprobleme zerlegt, die getrennt optimiert werden [13]. Allerdings können Strompaarungen, die günstig im Gegenstrom über den „pinch“ hinweg gekoppelt werden sollten, zu Problemen führen.

Die Bedeutung des „pinch“ kommt auch in der Entwurfsmethodik von Linnhoff und der Darstellung im „grid diagram“ (*Bild 6*) zum Ausdruck. Der Entwurf geht vom „pinch“ aus und bewegt sich im unteren und oberen Teil vom „pinch“ weg. Er erfolgt schrittweise, dekomponiert, und beinhaltet heuristische Regeln zur Erzielung einfacher Strukturen.

Zuerst werden Ströme, bei denen Komplikationen zu erwarten sind, im Gegenstromprinzip maximal verkoppelt. Das bedeutet die Verkopplung von Strömen, deren

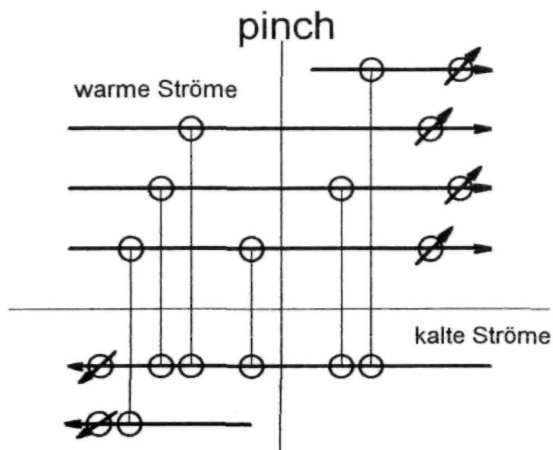


Bild 6: Darstellung von Wärmeübertragerstrukturen für die Synthese im „grid diagram“ nach Linnhoff

Verhältnis der Wärmekapazitäten auf der dem „pinch“ abgewandten Seite zur Erreichung minimaler Temperaturdifferenzen führt, in möglichst großen Einheiten. Dann wird das Restsystem strukturiert. Die Erreichung des „target“ liefert die Information über die Effektivität des Vorgehens.

Im „grid diagram“ sind warme und kalte Ströme getrennt und nach ihrer Lage zum „pinch“ eingetragen. Das vollständige Bild

enthält außerdem Temperatur- und Wärmeangaben. Jede regenerative Wärmeübertragereinheit ist zweimal mit ihren Anteilen an der Energiebilanz - bei den warmen und bei den kalten Strömen - vertreten und durch eine Verbindungslinie markiert. Kreuzungen dieser Linien weisen auf eine Verletzung des Gegenstromprinzips und Ursachen für das Nichterreichen des „target“ hin. Eine zum „grid diagram“ im Informationsgehalt analoge Darstellung kann übrigens auch durch das Temperatur-Wärmeinhalts-Diagramm erreicht werden [10].

Eine geschlossene Optimierung des Wärmeübertragungssystems ist nur mit mathematischen Methoden möglich. Eine Linearisierung des Problems führt zur Transportoptimierung bzw. der speziellen Variante als Zuordnungsproblem [10, 19 bis 21]. Voraussetzung für die Linearisierung ist die Zerlegung der Wärmeströme in Wärmeelemente. Für die Wärmeelemente werden dann für jede mögliche Kopplung mit Elementen anderer Ströme die Kostenfunktionen berechnet. Diese dienen als Grundlage der Optimierungsrechnung. Auf diese Art können neben der Struktursynthese sowohl „pinch“ [11] lokalisiert werden, als auch **äußere Ströme** in die Struktursynthese einbezogen und spezielle Wärmeübertragungsbedingungen berücksichtigt werden

Leider werden mit dieser Methode, die keine degressive Zielfunktion berücksichtigen kann, oft so komplexe Lösungen erzielt, daß sie einer weiteren Bearbeitung bedürfen. Die Methode kann außerdem als erster Bearbeitungsschritt zur Erzeugung von Netzen mit einer minimalen Anzahl von Wärmeübertragungseinheiten und als Basis für die weitere Anwendung von Strukturparametermethoden dienen [22],

Strukturparametermethoden [13] basieren auf Überstrukturen, die alle Varianten enthalten. Die Strukturparameter legen über Verzweigungen und Mischungen (Wertebereich zwischen Null und Eins) fest, welche Strukturen zu realisieren sind. Die Auslegung der Wärmeübertragungseinheit wird in das Optimierungsproblem einbezogen. Aufgrund der Größe des Problems kann aber auch mit diesen Methoden, trotz der prinzipiellen Möglichkeit, keine geschlossene Lösung erreicht werden. Die Anzahl der theoretisch möglichen Kopplungsvarianten beträgt $(n_k * n_w)!$, mit n_k als Anzahl der warmen und n_w als Anzahl der kalten Ströme. Schon bei dem recht einfachen 6SP1-Beispielproblem ergeben sich etwa $3,5 * 10^5$ Strukturvarianten, die im wesentlichen hinsichtlich der thermodynamisch möglichen Kopplungen eingeschränkt werden müssen. Da die Wärmübertragungsverhältnisse und die Zielfunktion nichtlinear sind, müssen zum Finden des Optimums nichtlineare Optimierungsstrategien auf numerischer Basis angewendet werden. Die Synthese des Netzwerkes besteht damit z.B. aus 5 Schritten [13]:

- 1) Bestimmen der „pinch points“ und der minimalen Wärmezu- und -abfuhr (Bestimmen der Betriebskosten) durch lineare Transportoptimierung (LP)
- 2) Bestimmen der minimalen Anzahl von Wärmekopplungen und der in ihnen übertragenen Wärme durch gemischtganzzahlige lineare Optimierung des Transportproblems (MILP)
- 3) Ableiten der Überstruktur („superstructure“) aus der Lösung
- 4) Minimieren der Investitionskosten für das innere System, für jeden durch „pinch“ begrenzten Bereich, durch nichtlineare Optimierungsmethoden (NLP)
- 5) Endgültiger Netzwerkentwurf, evtl. Iteration zu 1) zur Optimierung von A^T_{min}

Die Reihenfolge der Bearbeitungsschritte spiegelt dabei die im Zusammenhang mit der Zielfunktion und ihren Trends weiter oben gemachten Ausführungen wieder. Die mathematischen Methoden sind auch aus anderen Bereichen bekannt. Die Erzeugung der Überstrukturen für Wärmenetze stellt aber eine methodische Besonderheit dar.

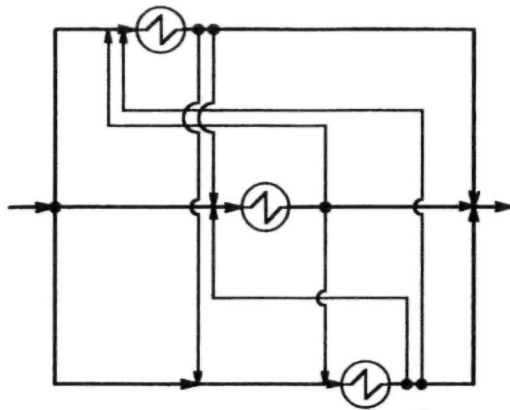


Bild 7: Beispiel für die Erzeugung einer Überstruktur („superstructure“) bei der möglichen Kopplung eines Stromes mit drei anderen Strömen (nur von der Seite des einen Stromes gesehen)

Bild 7 illustriert das für die mögliche Kopplung eines Stromes mit drei anderen Strömen. Die drei anderen Ströme sind durch Wärmeübertrager gekennzeichnet, die jeweils diesen Strömen zugeordnet sind. Jeder dieser Ströme kann eine analoge Struktur im Hintergrund aufweisen, wie sie der eingezeichnete Strom aufweist.

Der betrachtete Strom wird auf alle drei Kopplungseinheiten aufgespalten und nach diesen wieder vereint. Nach allen Kopplungseinheiten existieren

Aufspaltungen, die Rückführungen zu den anderen Kopplungseinheiten realisieren. Damit sind Parallelschaltungen und Reihenschaltungen in beliebiger Reihenfolge und entsprechende Zwischenformen je nach Festlegung der Parameter bei der Aufspaltung

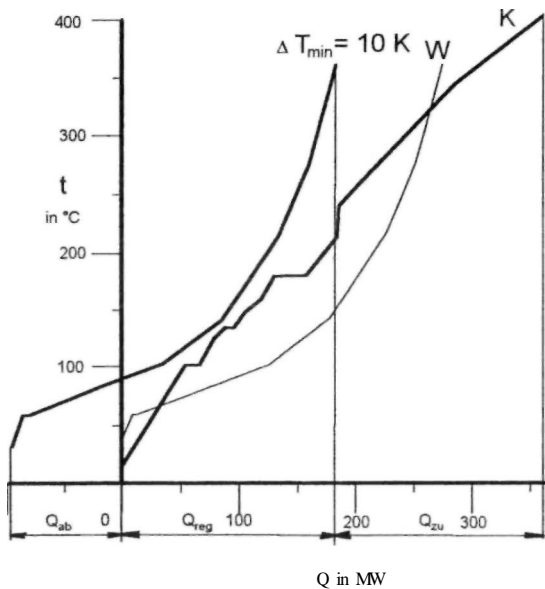


Bild 8: Beispiel eines t,Q -Diagrammes für eine Rohöldestillationsanlage mit einer Jahreskapazität von 6 Mio. t

zu realisieren. Die Größe des Modellierungsproblems und die Notwendigkeit der automatischen Erzeugung der Überstruktur wird deutlich, wenn man bedenkt, daß neben der Modellierung der Kopplungseinheiten auch die Massen- und Energiebilanzen für alle Verzweigungen und Vereinigungen modelliert werden müssen.

Im folgenden sollen kurz die quantitativen Verhältnisse in Wärmenetzen an einem industriellen Beispiel gezeigt werden (Bild 8) [11]. Es handelt sich hierbei um eine Rohöldestillationsanlage mit

einer Jahresproduktion von 6 Mio. t, bestehend aus 8 Hauptkolonnen mit 4 Nebenkolonnen, 5 zirkulierenden Rückläufen und 6 Seitenstromentnahmen.

Die in der bestehenden Anlage realisierte Regeneration von 111 MW konnte mit einer relativ einfachen neuen Wärmeübertragerstruktur, die konservativen Vorstellungen von Komplexität und Steuerbarkeit entgegenkam, auf 170 MW erhöht werden. Technisch realisierbare Varianten wiesen eine Wärmerückgewinnung bis zu 190 MW bei geringfügigen Änderungen in der Gesamtanlage aus. Das zur Struktursynthese eingesetzte EDV-Programm beinhaltete die Analyse des t,Q -Diagrammes, die Zuordnungsmethode, verbunden mit der Analyse von Einsatzmöglichkeiten für Wärmepumpen, die Verwendung heuristischer Regeln und eine Systemevolution zu einfacheren Strukturen.

An dem Diagramm ist auffällig, daß man aus technischer Sicht weniger von einem oder mehreren „pinch points“ sondern eher von einem Engpaß-Bereich sprechen sollte. Für diesen Bereich konnten erst unter Verwendung der EDV optimale Lösungen gefunden werden, die den mit graphischen Methoden vorher gefundenen Lösungen [15] überlegen waren.

Dies war möglich, obwohl der industrielle Partner Stromaufspaltungen aus steuerungstechnischen Gründen nur in sehr begrenztem Maße und nur für den Rohölstrom akzeptierte.

Der Verlauf der exergetischen Wirkungsgrade im regenerativen Wärmeübertragersystem (Bild 9) zeigt, warum die Exergie zweckmäßigerweise nicht direkt in Syntheseprozeduren eingebaut werden

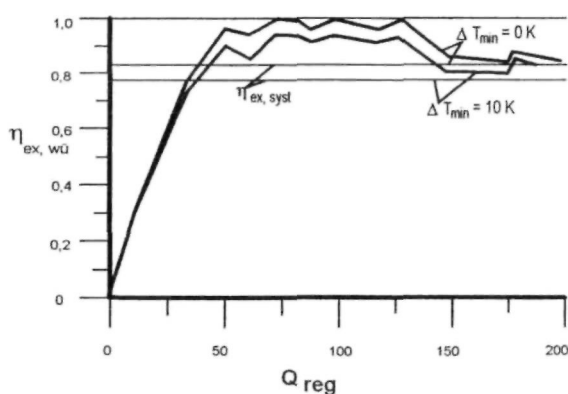


Bild 9: Die exergetischen Wirkungsgrade der Wärmeübertrager im optimal gestalteten Wärmeübertragungssystem einer Rohöldestillationsanlage

selbst im günstigsten Grenzfall weist das regenerative System nur einen Gesamtwirkungsgrad von 83% aus. Die Ursache sind unvermeidbare Verluste, die dadurch entstehen, daß das Problem als reines Wärmeübertragungsproblem ohne die Möglichkeit des Kreisbetrachtet wird. Aus diesem Grunde

schwanken auch die Wirkungsgrade in den einzelnen Bereichen sehr stark (die regenerativ übertragene Wärme ist im Diagramm nach der Temperatur geordnet).

Die Bestimmung der unvermeidbaren Verluste aus dem t,Q-Diagramm und eine Relativierung der exergetischen Wirkungsgrade ist zwar für die Bewertung möglich, stellt aber für die Struktursynthese einen unnötigen Umweg dar.

Wechselwirkung zum Gesamtsystem

Zur Verringerung der Verluste im Wärmeübertragungssystem besteht auch die Möglichkeit der Beeinflussung des t,Q-Diagrammes durch Veränderungen bei den Stoffwandlungsprozessen. Für Destillationskolonnen ist z.B. der Druck der Destillation und damit die Temperatur der Wärmeabgabe am Kopf und der Wärmezufuhr im Sumpf und die Lage der Temperatur durch Wärmezufuhr und -abfuhr durch Einlaufvorwärmung und zirkulierende Rückläufe beeinflussbar [11a]. Bei genaueren Betrachtungen muß bei diesen Veränderungen die Stofftrennung neu berechnet werden. Das Verlagern einer Wärmezufuhr- bzw. -abfuhr im t,Q-Diagramm von einer Stelle zur anderen - sie verschwindet bei einer Temperatur im Diagramm und taucht an einer anderen Stelle wieder auf- wird von Linnhoff „plus-minus-principle“ genannt.

Im *Bild 10* sollen die Effekte für eine Rektifikation mit etwa gleicher Wärmezufuhr- und -abfuhr an Sumpf und Kopf beispielhaft diskutiert werden.

Die ausgezogenen Linien im t,Q-Diagramm kennzeichnen die ursprünglichen Verläufe der Summenkurven für die Gestaltung des regenerativen Wärmeübertragungssystems mit einem entsprechenden „pinch point“. Dazu sind ergänzend drei Varianten für die Wärmebilanz einer zusätzlichen Rektifikationskolonne eingetragen, die z.B. annähernd die Lösung derselben Stofftrennaufgabe bei verschiedenen Drücken charakterisieren könnten.

Mit gutem Grund ist keine Variante eingezeichnet, die den „pinch“ kreuzt. Die Rektifikation ist im Beispiel dadurch gekennzeichnet, daß der Wärmebedarf im Sumpf bei der höheren Temperatur etwa gleich groß der Wärmeabgabe im Kopf bei der niederen Temperatur ist und keine weiteren zusätzlichen Wärmeströme auftreten. Die Energiebilanz ist also für die Rektifikationskolonne ausgeglichen. Sie hat Netto keinen Energie- sondern einen Exergiebedarf. Das heißt, wenn man sie in Bereichen

einordnet wo überschüssige Triebkräfte existieren (also Exergieverluste genutzt werden können), kann man sie im vorhanden System (bei apparativer Umgestaltung des regenerativen Wärmeübertragungssystems) ohne zusätzlichen äußeren Energiebedarf betreiben. Das ist prinzipiell bei einer Anordnung entweder vollständig oberhalb oder vollständig unterhalb des „pinch“ möglich.

Die neuen Summenkurven im t, Q -Diagramm ergeben sich durch Fortzeichnen mit einer Parallelverschiebung der ursprünglichen Variante oberhalb der Wärmezufuhr- bzw. -

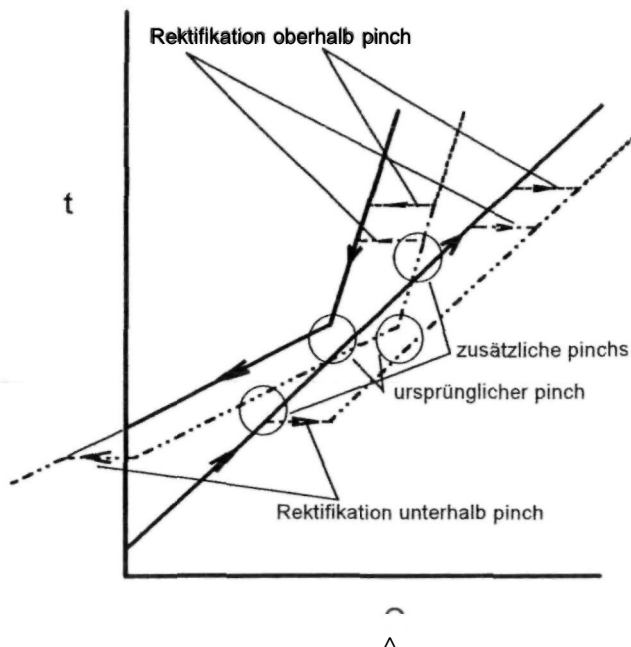


Bild 10: Möglichkeiten einer zusätzlichen, günstigen Einordnung der Wärmezufuhr- und -abfuhr einer Rektifikationskolonne im t, Q -Diagramm, ohne daß ein zusätzlicher äußerer Wärmebedarf entsteht,

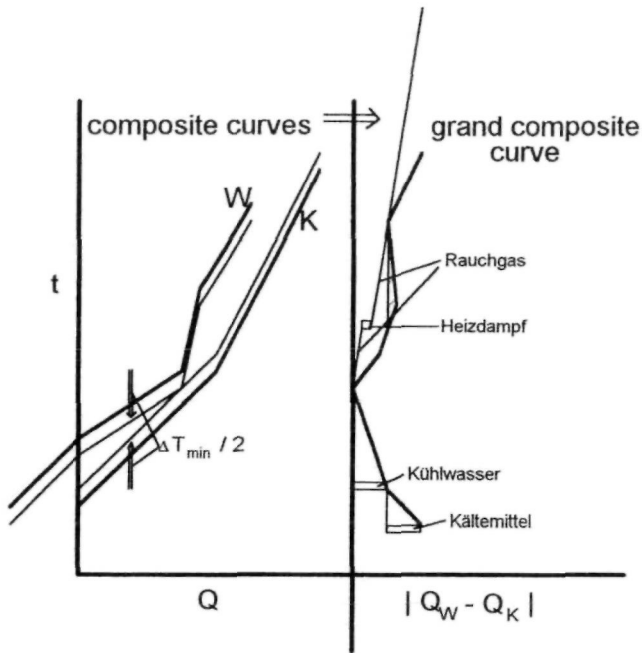
abfuhr der Varianten. Es wird deutlich, daß auch oberhalb oder unterhalb des ursprünglichen „pinch“ Randbedingungen einzuhalten sind. Die Triebkräfte müssen zum zusätzlichen Betreiben der Rektifikation ausreichen. Die zusätzlichen „pinch“ kennzeichnen Grenzwerte, ab denen ein Einsatz möglich ist.

Auch andere Prozesse sind bezüglich ihrer Einsatzmöglichkeiten nach ihrer Lage zum „pinch“ beurteilbar [4, 23], Rechtsprozesse sind entweder oberhalb oder unterhalb

des „pinch“, Linksprozesse über den „pinch“ zu realisieren.

Die Ankopplung des regenerativen Systems an das äußere System der Wärmezufuhr- und -abfuhr erfordert zusätzliche Überlegungen zu einem sinnvollen Triebkraftabbau. Dabei kann die Analyse des Wärmebedarfs nach Bestimmung der regenerativen Möglichkeiten in Abhängigkeit von der Temperatur sehr sinnvoll sein. Linnhoff

nennt die Gesamtbetrachtung „total site integration“ und empfiehlt zur Analyse der Verhältnisse die „GRCC - grand composite curve“.



Die prinzipielle Konstruktion dieser Kurve aus den Summenkurven, „composite curves“ des t,Q-Diagrammes und ihre beispielhafte Anwendung ist in *Bild II* dargestellt. Das Prinzip besteht darin, daß bei den entsprechenden Temperaturen oberhalb des „pinch“ der Nettowärmebedarf und unterhalb des „pinch“ die notwendige Nettowärmeabfuhr bestimmt wird. Dazu ist das t,Q-Diagramm wie zu konstruieren,

üblich

Bild 11: Erzeugung der „grand composite curves“ aus den Summenkurven der kalten und warmen Ströme „composite curves“ wobei die warme und die kalte Kurve in senkrechter

Richtung um $\Delta T_{min} / 2$

aufeinander zu verschoben werden. Die Differenz in waagerechter Richtung ist dann im rechten Diagramm einzutragen.

Im rechten Diagramm ist damit darstellbar, wie man Heiz- und Kühlmittel anordnen kann, so daß möglichst geringe Triebkräfte zwischen Bedarf und Bereitstellung bestehen. Im Prinzip entstehen neue „pinch“ zwischen den Heiz- und Kühlströmen und den Strömen des Wärmeübertragersystems, die wiederum einer Optimierung unterzogen werden können. Den selben Effekt würde man erreichen, wenn man die Summenkurven des t,Q-Diagrammes um die Heiz- und Kühlströme so ergänzen würde, daß die Energiebilanz ausgeglichen wäre, und Heizströme mit möglichst niedriger Temperatur (bis zu neuen „pinch“) und Kühlstrom mit möglichst hoher Temperatur

hinzufügen würde. Die „grand composite curve“ ist aber für solche Betrachtungen übersichtlicher.

Die Zielstellung entspricht der in Bild 1 diskutierten Energiekaskade. Die Erzeugung von zusätzlichen „pinch“ bedeutet den Einsatz zusätzlicher Wärmeübertragerflächen. Das macht natürlich nur Sinn, wenn Freiheitsgrade bei der Energieträger- oder Kühlmittelbereitstellung existieren, die zu positiven Effekten im Gesamtsystem führen. Im allgemeinen hat man bei der Energieversorgung verschieden Bereitstellungs-niveaus, so daß sich zumindest bestimmen läßt, welche Wärmeströme vom Heizdampf welchen Druckniveaus und welche über Verbrennung durch Rauchgase bereitgestellt werden müssen. Es kann gleichfalls festgestellt werden, in welchen Bereichen Wasserkühlung, Luftkühlung oder Kältemittel einzusetzen sind. Diese Fragen lassen sich auch durch Optimierungsrechnungen für das Gesamtsystem lösen [8].

Die GRCC läßt sich übrigens auch für die Verbindung der Stoffwandlungskaskade mit dem Wärmeübertragersystem einsetzen [4]. So kann z.B für eine Rektifikationskolonne der Nettowärmebedarf für den Abtriebsteil und die Nettowärmeabfuhr für den Verstärkungsteil über die Kolonne und damit über die Temperatur dargestellt werden. Damit ergeben sich Anhaltspunkte für die Möglichkeit, die Wärmezufuhr vom Sumpf zum Einlauf zu verlagern und damit ihre Temperatur zu verringern oder die Wärmeabfuhr vom Kopf zu zirkulierenden Rückläufen zu verlagern und damit das Temperaturniveau zu erhöhen.

Reoptimierungsaufgaben

Ein beträchtlicher Teil der Aufgabenstellungen betrifft Reoptimierungsaufgaben an bestehenden Anlagen. Die qualitative Charakteristik der Problemstellung geht aus *Bild 12* hervor [4, 24],

Die Tendenz für das innere Wärmeübertragersystem besteht darin, daß zusätzlicher Flächeneinsatz die im inneren System übertragbare Wärme erhöht und damit Wärmezu- und -abfuhr im äußeren System verringert. Die optimalen Verhältnisse für diesen Zusammenhang ergeben sich aus dem Gegenstromprinzip, wie sie im t,Q -Diagramm dargestellt wurden. Sie sind als Grenzkurve eingezeichnet. Bessere Verhältnisse sind nicht möglich. Bei Begrenzungen der im inneren Sytem übertragbaren Wärme durch

„pinch“ spielt ΔT_{\min} eine entscheidende Rolle für die im inneren System übertragbare Wärme.

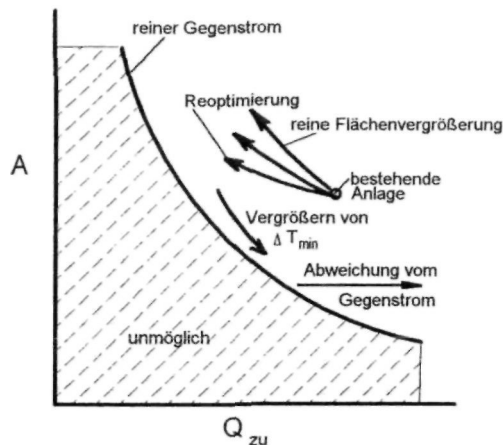


Bild 12: Qualitativer Zusammenhang zwischen im inneren System installierter Fläche und notwendiger äußerer Wärmezufuhr in Verbindung mit möglichen Varianten bei der Reoptimierung von Anlagen

Abweichungen vom Gegenstromprinzip führen in das Gebiet rechts von der Grenzkurve. In diesem Bereich sind im allgemeinen bestehende Anlagen zu finden.

Reine Schaltungsveränderungen bei Beibehaltung der Wärmeübertrager würden waagrecht in Richtung der Grenzkurve führen. Solche Varianten sind jedoch selten. Eine reine Flächenvergrößerung bestehender Wärmeübertrager ist im allgemeinen nicht effektiv und in ihrer Anwendung begrenzt. Die Ursachen liegen darin, daß Strukturfehler im allgemeinen die in

einzelnen Wärmeübertragern übertragbare Wärme begrenzen. Das heißt, das Gegenstromprinzip wirkt zweifach, einmal auf die zur Verfügung stehenden Triebkräfte und einmal auf die Begrenzung der prinzipiell übertragbaren Wärmen.

Das Ziel besteht darin, sich mit möglichst kleiner Flächenvergrößerung und möglichst großer Erhöhung der regenerativen Wärmeübertragung der Ziellinie anzunähern, wobei gewöhnlich für die Reoptimierung noch Amortisationsfristen einzuhalten sind. Die Reoptimierung hat also zwei Effekte, zum einen die Verbesserung der regenerativen Energienutzung und zum anderen durch Verbesserung der Struktur eine effektivere Nutzung der Investitionen bei Senkung der Gesamtkosten.

Bei Reoptimierungen sind gewöhnlich eine Reihe technologischer Randbedingungen zusätzlich zu beachten. Das erfordert, daß man das Wirken dieser Randbedingungen analysiert. Das ist z.B. über das t, Q -Diagramm leicht möglich. Bei Vorgabe bestimmter Kopplungen und der in ihnen zu übertragenden Wärmen, kann leicht analysiert werden, welche Konsequenzen dies für das Restsystem hat, und ein Vergleich mit einem ungestörten Entwurf vorgenommen werden.

Offene Probleme

Die offenen Probleme beziehen sich hauptsächlich auf die als Imponderabilien angeführten Eigenschaften von Wärmenetzen, die bei der Optimierung nicht beachtet wurden und nicht Bestandteil der Zielfunktion waren. Sie erfordern im allgemeinen zusätzliche Simulationsmodelle.

Eine wesentliche Eigenschaft, insbesondere im Zusammenhang mit Batch-Prozessen, Mehrproduktanlagen und unterschiedlichen Fahrweisen ist die Flexibilität der Netze. Flexibilität bedeutet, die Erfüllung der geforderten Funktion unter geänderten Randbedingungen.

In den meisten Fällen schneiden nach den oben angeführten Methoden optimierte Wärmenetze besser ab als konventionelle Netze [4, 11a]. Die Ursachen bestehen in der mit einer Verringerung der Triebkräfte verbundenen Vergrößerung der Wärmeübertragerflächen. Der Zusammenhang zwischen Temperatur und thermischer Energie ist annähernd linear und der zwischen übertragener Wärme und Temperaturdifferenz annähernd logarithmisch. Das bedeutet, daß bei geringen Triebkräften - etwa am Ende der Wärmeübertrager - überproportionale Flächen für die Wärmeübertragung eingesetzt werden, die bei Änderung der Randbedingungen wie Reserven oder Puffer im Netz dämpfend wirken.

Das eigentliche Problem besteht darin, daß sich bei der Änderung der Randbedingungen die Lage der „pinch“ und die thermodynamisch mögliche Zuordnung von Strömen verändern kann. Das erfordert Strukturänderungen, die über entsprechende Leitungsführungen und Steuerungen im Prinzip realisiert werden können. Eine solche Realisierung wirft aber Sicherheits-, Zuverlässigkeits- und Steuerungsprobleme auf. Der zu findende Kompromiß ist schwierig zu bewerten. Bei der Komplexität der Problemstellung dürften hier Entwicklungsmöglichkeiten für wissenschaftliche und „fuzzy“ Strategien gegeben sein.

Eine andere Möglichkeit besteht im Einsatz der Strukturparametermethoden, wobei neben dem bestehenden System zusätzliche Eckfahrweisen mit entsprechender Bewertung und der Bedarf an zusätzlichen Flächen und Verbindungsmöglichkeiten in die Berechnung einbezogen werden [25],

Im Bild 13 wird das Prinzip der erzielten Lösung verdeutlicht. Die gestrichelten Linien stellen zusätzliche Verbindungen mit einer kontinuierlichen Möglichkeit der

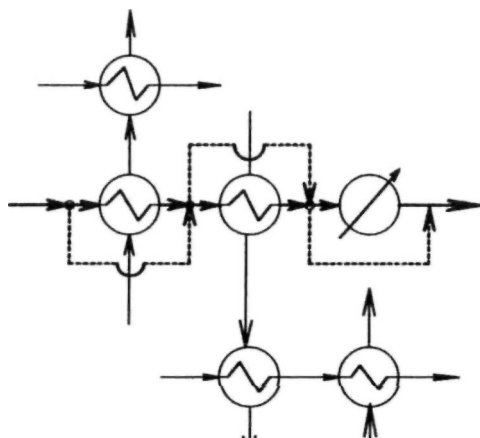


Bild 13: Möglichkeit einer Schaltung zur Erhöhung der Flexibilität eines Wärmeübertragersystems

Stromverzweigung und anschließender Vermischung dar. Prinzipiell wird die Flexibilität durch erhöhten Flächeneinsatz erreicht. Die Zusätzlichen Leitungsführungen stellen Umgehungen der Wärmeübertrager zur Regelung dar. Eine Umfahrung der Wärmeübertrager bewirkt, daß aufgrund des logarithmischen Triebkraftverhaltens am Ende des Wärmeübertragers für den warmen Strom zwar niedrigere Temperaturen erreicht werden, der übertragene Wärmestrom aber geringer ist als ohne Um-

fahrung. Nach der anschließenden Mischung ergibt sich also eine höhere Temperatur. Natürlich setzt die hydraulische Auslegung von Wärmeübertragern solchen Fahrweisen Grenzen. Die größte Schwierigkeit dürfte allerdings in der automatisierten Regelung dieser Struktur liegen.

Eine andere Möglichkeit besteht in der Regelung der Energiebilanz durch äußere Wärmez- und -abfuhr, wie sie in der Energietechnik üblich ist [19]. Das kann im Extremfall nach jeder regenerativen Kopplung erfolgen und führt zu einfachen Regelalgorithmen. Die Energiekosten und Investitionskosten dürften bei diesem Vorgehen in vielen Fällen aber nicht optimal sein.

Das dynamische Verhalten der Wärmenetze verdient in diesem Zusammenhang gleichfalls eine Untersuchung [26]. Im allgemeinen treten in Wärmeübertragersystemen keine besonderen Probleme auf. Das stationäre Verhalten wird zumindest nach ein bis zwei Stunden wieder erreicht. Allerdings sind aufgrund der Speichereigenschaften der Wärmeübertrager bei Fahrweiseänderungen Verschiebungen in der beabsichtigten Wärmestromrichtung möglich. Das heißt ein zu kühlender Strom kann in einzelnen Wärmeübertragern zeitweise und geringfügig aufgeheizt werden. In diesen Fällen ist über die Zulässigkeit solcher Zustände zu entscheiden

Batch-Prozesse und Mehrproduktanlagen rufen neben einer grundsätzlich anderen Fahrweise auch Probleme hinsichtlich des Optimierungszieles hervor. Bei mehreren konkurrierenden Prozessen mit Energiebedarf besteht das Ziel nicht allein in einer Senkung des Energiebedarfes des einzelnen Prozesses, sondern auch in einer gleichmäßigen Energieabnahme für alle Prozesse. Das drückt sich betriebswirtschaftlich in der Gestaltung der Energietarife aus, was zu einer beträchtlichen Modifizierung der Optimierungsstrategien führen kann [27].

Die Steuerbarkeit von Wärmenetzen muß von ihrer Flexibilität unterschieden werden. Hier steht die Beherrschbarkeit durch Stell-, Steuerungs- und Automatisierungstechnik im Vordergrund. Besonders durch Strukturparametermethoden werden häufig optimale Netzwerke mit relativ wenig Wärmeübertragungseinheiten aber einer Vielzahl sich ständig ändernder Stromaufspaltungen ausgewiesen. Diese Strukturen sind als technisch wesentlich schwerer beherrschbar einzuschätzen als Strukturen mit einer größeren Anzahl von Wärmeübertragern, die sich in Reihenschaltungen oder Springschaltungen (rekursive wiederholte Kopplung der gleichen Ströme) befinden. Prinzipiell kann das in der Zielfunktion berücksichtigt werden. Diese muß dann aber einen systemanalytischen Anteil enthalten [11a]. Die Beherrschung der Stromaufspaltungen ist nicht nur mit Fragen der Automatisierungsalgorithmen, sondern auch mit hydraulischen Fragen hinsichtlich Druckverlusten und Kennlinien der Stellglieder verbunden.

Stand und Ausblick

Die Vielzahl von Veröffentlichungen zu Wärmenetzen zeigt den fortgeschrittenen Erkenntnisstand. Es ist möglich, Wärmenetze für praktische Anwendungen industriell so auszulegen, daß sie den Anforderungen einer rationellen Energieverwendung entsprechen. Die Unterteilung in thermodynamische, wissensbasierte und mathematische Methoden sollte nicht als Konkurrenz sondern als Ergänzung aufgefaßt werden.

Es gibt keine Methode, die in allen Situationen das garantiert optimale Netzwerk entwirft. Alle Methoden, auch die mathematischen Methoden, enthalten heuristische Elemente in der Modellbildung, die bei der Komplexität und Größe des Problem

notwendig sind. Das betrifft bei der Strukturparametermethode z.B. die Dekomposition des Problems an den „pinch“, den Aufbau der „superstructure“ ausgehend von einem Netzwerk mit einer minimalen Anzahl von Kopplungseinheiten, die das energetische „target“ erfüllt, bis zum Einsatz von numerischen Optimierungsstrategien für das nichtlineare Problem.

Der Vergleich der Methoden an Beispielen spielt für den Nachweis ihrer Leistungsfähigkeit und Mächtigkeit in der Literatur zwar eine große Rolle, ist aber für den praktischen Einsatz oft nicht wesentlich. Im allgemeinen sind die Methoden in der Lage eine Reihe von fastoptimalen Lösungen zu erzeugen. Diese Lösungen unterscheiden sich oft in ihren Zielfunktionswerten nur unwesentlich, weisen aber hinsichtlich der als Imponderabilien ausgewiesene technischen Eigenschaften beträchtliche Unterschiede auf. Das macht eine Bearbeitung der Probleme im Dialog zwischen Ingenieur und Computer zum unbedingten Erfordernis. Thermodynamische Diagramme und effektive Strukturdarstellungen fördern diesen Prozeß, unabhängig davon welche Optimierungsmethode implementiert wurde.

Für die ingenieurtechnische Bearbeitung stehen eine Reihe von Programmsystemen zur Verfügung [4, 5], wobei sich die kommerzielle Nutzung auf solche der „pinch point“-Methode konzentriert. Die Programmsysteme ADVENT[28], HEXTRAN [29], INTERHEAT (HEATNET) [30], SUPERTARGET [31] basieren auf dieser Methode oder beinhalten doch wenigstens wesentliche Elemente.

Dabei war das 1980 eingeführte HEXTRAN das erste und längere Zeit einzige kommerzielle Programm zur Netzwerksynthese. Es wendet konsequent die „pinch point“-Methode zur Flächenminimierung an und realisiert anschließend einfachere Strukturen durch Evolution.

ADVENT wurde 1985 von der Union Carbide Corp. kommerziell eingeführt und ist im Dialog grafisch und fensterorientiert. Module für eine detaillierte Wärmeübertragerberechnung, Prozeßmodifikationen, Trennprozesse, Kraft-Wärme-Kopplung, Öfen, Steuerbarkeit und Flexibilität sind vorhanden

INTERHEAT wurde als interaktives Programm in Norwegen entwickelt und als HEATNET in Großbritannien weiterentwickelt. Es enthält eine physikalische Stoffdatenbasis und detaillierte Wärmeübertragerberechnungen. Wärmepumpen und Turbinenmodelle sind vorhanden. Die „pinch“-Methode wird mit anderen mathematischen Optimierungsmethoden verknüpft

SUPERTARGET liefert ein aus dem t,Q -Diagramm optimiertes AT_{\min} und über Tools Tabellen zur Sytemsynthese.

Die Programme RESHEX [32] und MAGNETS [33] sind dem universitären Bereich zuzuordnen, kennzeichnen die Forschungsergebnisse von Arbeitsgruppen und enthalten Transportoptimierungs- und Strukturparameteroptimierungsmodelle.

Die meisten Anwendungsfälle sind im Bereich der erdölverarbeitenden und chemischen Großindustrie zu finden. Für deren Bedürfnisse sind auch der Methodenvorrat und die EDV-Programme am besten angepaßt. Probleme ergeben sich im Bereich der Mehrproduktentechnologie und der Batch-Prozesse. Die iterative Bearbeitung der dort anfallenden Probleme kann die Erreichung globaler Optima nicht garantieren. Hier ist eine methodische Erweiterung notwendig. In diesem Bereich könnten auch andere technische Lösungen wie Wärmespeicher und zusätzliche Wärmeträgernetze sinnvoll sein. Die Zuwendung zu den Problemen dieses Bereiches zeigen neuere Veröffentlichungen an. In diesem Zusammenhang gewinnen die Fragen der Steuerbarkeit und Flexibilität von Wärmenetzen zunehmend an Bedeutung.

Für die Anwendung der bestehenden Methoden sind Programmsysteme wünschenswert, die Optimierung, Simulation und wissensbasierte Empfehlungen miteinander verbinden. Die bestehenden Programmsysteme weisen in diese Richtung, sind aber noch zu sehr an speziellen Methoden orientiert. Es sollten unterschiedliche Methoden zur Auswahl implementiert sein.

Literatur

- [1] W. Fratzscher, V. M. Brodjanskij, K. Michalek: Exergie - Theorie und Anwendung. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig, 1986. Distributed by Springer-Verlag Wien - New York.
- [2] W. Fratzscher, K. Michalek: Einige Überlegungen zur systematischen Gestaltung der rationalen Energieanwendung. Wissenschaftliche Berichte der Ingenieurhochschule Zittau 602 (1985).
- [3] J. Fresner, H. Schnitzer, F. Moser: HPERT - A knowledge-based System for the integration of heat pumps in process heat exchanger networks. Proc. ESCAPE (European Symposium on Computer Aided Process Engineering) - 2, 1992, 77 - 82.
- [4] B. Linnhoff: Pinch analysis - a state-of-the-art overview. Trans IChemE. Vol. 71, part A, sept. 1993.503-522.

- [5] T. Gundersen, L. Naess: Review paper - the synthesis of cost optimal heat exchanger networks - an industrial review of the State of the art. *Comput. chem. Engng.*, Vol. 12 (1988), No. 6, 503 -530,
- [6] S. Weiß u.a.: Verfahrenstechnische Berechnungsmethoden. Tl. 6 Verfahren und Anlagen, 6. Abschn. Struktursynthese verfahrenstechnischer Systeme, 174 ff. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig. 1984. Distributed by Springer-Verlag Wien - New York.
- [7] E. C. Hohmann: Optimum networks for heat exchange PhD. Thesis, Univ. of Southern California (1971).
- [8] L. Rockstroh. H. Hartmann: Optimale Dimensionierung von Wärmeübertragungssystemen mit beliebig vielen Heiz- und Kühlströmen. *Chemische Technik* 27 (1975) H. 8, 439 - 441.
- [9] B. Linnhoff u.a.: User guide on process integration for the efficient use of energy. IChemE, 1982, Rugby.
- [10] N. Nishida, S. Kobayashi, A. Ichikawa: Optimal synthesis of heat exchange Systems. Necessary conditions for minimum heat transfer area and their application to System synthesis. *Chem. Engng. Sci.* 26 (1971) No. 11, 1841 - 1856.
- [11a] K. Michalek: Untersuchungen zur optimalen Gestaltung der Energiewirtschaft von Rohöldestillationsanlagen unter besonderer Beachtung des Wärmeübertragungssystems. Dissertation, 1978, TH Leuna-Merseburg.
- [11b] K. Michalek: Die optimale Gestaltung von Wärmeübertragungssystemen, gezeigt am Beispiel einer Rohöldestillationsanlage. *Energieanwendung* 30 (1981) H. 4, 134 - 139.
- [12] T. Umeda. T. Harada, S. Shiroko: Heat exchanger system synthesis *Chem. Engng. Prog.* 74 (1978), 70-76.
- [13] C. A. Floudas, A. R. Ciric. I. E. Grossmann: Automatic Synthesis of Optimum heat exchanger network configurations. *AIChE Journal* 32 (1986) No.2, 276 -290.
- [14] G. Zeising, M. Wagenknecht, K. Hartmann: Ein unscharfer Algorithmus zur Synthese von Wärmeübertragungssystemen. *wiss. Zeitschrift der TH Leuna-Merseburg*, 27 (1985). 62 -69.
- [15] Stieper: Wärmerückgewinnung aus mehreren Abwärmequellen. *Chemische Technik* 12 (1960) H. 2, 87-96.
- [16] S. Kobayashi, T. Umeda, A. Ichikawa: Synthesis of optimal heat exchange Systems - an approach by the optimal assignment problem in linear programming. *Chem. Engng. Sci.* 26 (1972), 1367- 1380.
- [17] B. Linnhoff. J. R. Flower: A thermodynamic approach to practical process network design. Paper 28b, AIChE 72nd annual meeting 1979.
- [18] J. Kardos, O. Strelow: Structural synthesis of heat exchanger networks with standardized exchangers. *Proc. 4th Conf. Appl. Chem, Veszprem 1983, unit Operation proc.* Vol.1, 65 - 70.
- [19] T. Hellwig, E. Thöne: Omnium: Ein Verfahren zur Optimierung der Abwärmenutzung. *BWK* 46 (1994) Nr.9. 393 - 397.
- [20] J. Cerda. A. W. Westerberg: Synthesing heat exchanger networks having restricted stream/stream match using transportation problem formulations. *Chem. Engng. Sci.* 38 (1983), 1723- 1740.
- [21] J. Cerda, A. Westerberg. D. Mason, B. Linnhoff: Minimum Utility usage in heat exchanger network synthesis - a transportation problem. *Chem. Engng. Sci.* 38 (1983). 337 - 387

- [22] S. A. Papoulias, I. E. Grossmann: A structural optimization approach in process synthesis. II: Heat recovery networks. *Computers and Chem. Engng.* 7 (1983) 707 - 721.
- [23] H. Bokelmann, V. Sahdev: Prozeßoptimierung mit der Pinch Technologie. VIK-Mitteilungen 2-1989.
- [24] T. N. Tjoe, B. Linnhoff: Using pinch technology for process retrofit. *Chem. Engng.* 28 (1986) No. 4, 47-60.
- [25] K. P. Papalexandri, E. N. Pistikopoulos: A multiperiod MINLP model for improving the flexibility of heat exchanger networks. *Proc. ESCAPE - 2, 1992*, SI 11 - SI 16.
- [26] S. Papastratos, A. Isambert, D. Depeyre: Computerized Optimum design and dynamic Simulation of heat exchanger networks. *Proc. ESCAPE -2, 1992*, S329 - S334.
- [27] E. Kondili, N. Shah, C.C. Pantelides: Production planning for the rational use of energy in multiproduct Continuous plants. *Proc. ESCAPE - 2, 1992*, S123 - S128.
- [28] ADVENT. Aspen Technology Inc., Ten Canal Park, Cambridge, Massachusetts 02141, USA.
- [29] HEXTRAN. Simulation Science, Brea, CA, USA.
- [30] INTERHEAT. Prof. Laken, Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norwegen. HEATNET. National Engineering Laboratory, East Kilbride, Glasgow, G75 0QU, Großbritannien.
- [31] SUPERTARGET. Linnhoff March Ltd., Tabley Court, Moss Lane, Over Tabley, Knutsford, WA16 0PL, Großbritannien.
- [32] RESHEX. Prof. Morari. University of Wisconsin, USA.
- [33] MAGNETS. Prof. Grossmann. Department of Chemical Engineering, Carnegie-Mellon University, Pittsburg, PA, 15213, USA.