Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 115 (1997)
Heft: 38

Artikel: Energetische Integration von Batch-Prozessen
Autor: Krummenacher, Pierre
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-79309

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 07.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Pierre Krummenacher, Lausanne

Energetische Integration von Batch-Prozessen

Eine grosse Anzahl industrieller Prozesse stellt Produkte im Batch-Verfahren her (z.B. Feinchemie, pharmazeutische Erzeugnisse, Bier, Milchprodukte). Dieses Produktionsverfahren ermöglicht eine hohe Nutzungsflexibilität und eine individuelle Qualitätskontrolle; der Energiekostenanteil gemessen am Mehrwert ist oft klein. Trotz dieser Umstände kann die energetische Integration begründet und wirtschaftlich rentabel sein, wenn beispielsweise infolge von Energiesparmassnahmen eine Limitierung der Produktionskapazität aufgehoben wird, oder wenn die Integration durch Glättung der Dampfleistung den Verzicht auf einen neuen Dampfkessel erlaubt.

Die Vielfalt der Prozesse, der Anlagetypen (Einprodukt-, Mehrprodukt- oder Mehrzweckanlage), der möglichen Zielsetzungen («Debottlenecking» - Ablaufplanoptimierung -, Energiekostenreduktion, «Scheduling» - Ablaufplanung - usw.) und der Prozessintegrationsprinzipien (direkte Wärmeübertragung, Zwischenspeicherung, «Rescheduling» - Ablaufplanänderung) sollte nicht entmutigend wirken. Der kombinierte Einsatz mehrerer einfacher Integrationsmethoden bei guter Kenntnis des Prozesses und der Anlage erlaubt schon in vielen Fällen die Beherrschung der Prozessintegration (besonders bei Einproduktanlagen).

Einteilung der Methoden

Die energetische Prozessintegration basiert auf einer Kombination von Methoden, welche in bezug auf den Prozess und die verfolgten Zielsetzungen ausgewählt werden. Diese Methoden kann man in drei Hauptgebiete einteilen: die mathematische Programmierung, die Pinch-Methode und die vereinfachten kombinatorischen Ansätze. Ursprünglich konkurrierend sollten diese Ansätze nun als Ergänzung genutzt werden (z.B. schnelle Analyse der erfolgversprechendsten Optionen durch die Pinch-Methode, anschliessend eine verfeinerte Optimierung über die mathematische Programmierung).

Die Werkzeuge der Pinch-Methode [1] bis [6] wurden im industriellen Umfeld schon verschiedentlich erfolgreich angewandt, besonders bei Einproduktanlagen. Die wichtigsten Methoden werden mittels eines konkreten Beispieles aufgezeigt und illustriert.

Im Gegensatz dazu bleiben die mathematischen Ansätze für die energetische Integration nach wie vor einigen Spezialisten des akademischen Umfeldes vorbehalten. Einige kürzlich vorgestellte Methoden (z.B. [7]), welche interessante und den oben erwähnten Methoden komplementäre Anwendungsperspektiven zeigen, werden hier kurz angesprochen. Diese mathematischen Methoden eignen sich im speziellen für das Scheduling und für die Planung der Fabrikationskampagnen der Mehrprodukt- und Mehrzweckanlagen.

Das Interesse der vereinfachten kombinatorischen Ansätze [8] und [9] liegt in der einfachen Anwendung, was in der industriellen Praxis besonders wichtig ist. Im Vergleich zur Anwendung der Pinch-Methode sind die gefundenen Lösungen nicht notwendigerweise wirtschaftlich und energetisch optimal. Dazu sind ihre Anwendungsbereiche beschränkt. Ein kurzer Vergleich der Methoden ist in der Tabelle (Bild 8) aufgeführt.

Beispiel eines Batch-Prozesses

Als Beispiel dient eine Einproduktanlage [4], welche im Batch-Verfahren produziert. In Bild 1 ist das Fliessbild der Anlage dargestellt. Diese besteht aus zwei Reaktoren und einer Destillationskolonne. Der Prozess besteht aus folgenden Etappen (die graugefärbten Komponenten und Angaben werden nicht berücksichtigt):

Die Rohstoffe werden im Reaktor R1 von 10 auf 60 °C Reaktionstemperatur erwärmt. Die Reaktion ist leicht exotherm, und die Temperatur steigt auf 100 °C. Das Produkt wird warm aus dem Reaktor in die Destillationskolonne K1 geführt, welche bei 120 °C arbeitet. Das Destillat wird von 110 auf 50 °C gekühlt und sammelt sich in einem Hochbehälter (B1). Das Produkt aus B1 (Zufuhr A bei 50 °C) und andere Stoffe (Zufuhr B bei 15 °C) werden in den Reaktor R2, welcher mit einem Rückflusskondensator ausgestattet ist, geführt. Das Gemisch wird auf 95 °C erwärmt, der Temperatur, bei welcher die stark exotherme Reaktion ausgelöst wird. Dies bewirkt das Verdampfen des Lösungsmittels bei 135 °C. Am Ende der Reaktion wird das Produkt von 140 auf 35 °C abgekühlt.

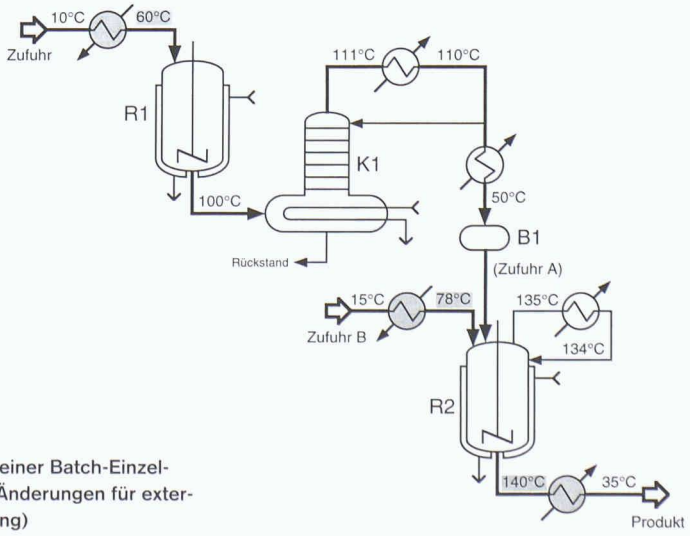
Das Gantt-Diagramm - auch Time-Event Chart genannt - (Bild 2a) zeigt den Funktionsablauf der wichtigsten Komponenten des Batch-Prozesses (R1, K1, R2) sowie die wichtigsten Etappen des Prozesses. Man sieht, dass mehrere Batches gleichzeitig in Verarbeitung sind (überlap-

Programme

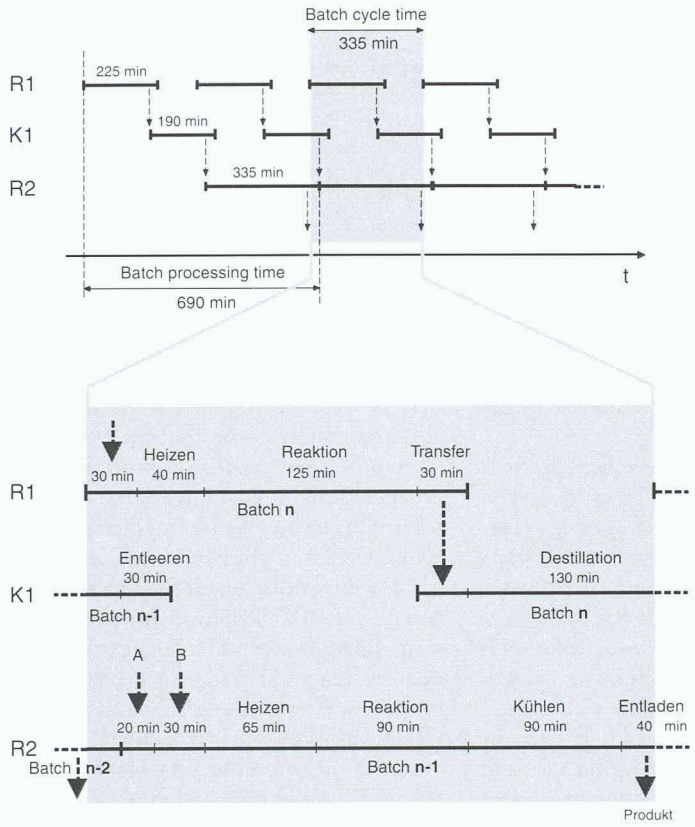
Mehrere Prozessintegrationsprogramme enthalten bereits einige der in diesem Beitrag angesprochenen Methoden. Es sind jedoch noch nicht alle diese Programme auf dem Markt erhältlich.

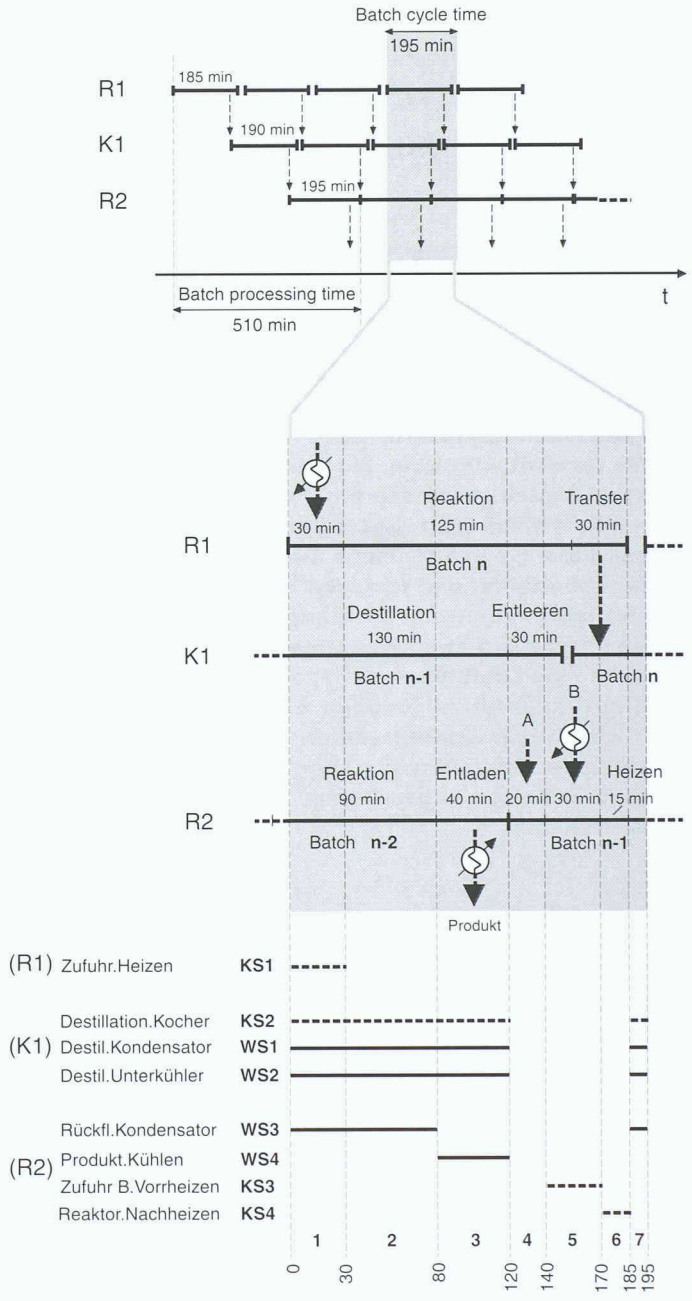
Ein Beschrieb diverser Prozessintegrationsprogramme befindet sich beispielsweise auf dem Internet:

http://www-interduct.wbmt.tudelft.nl



1
Beispiel eines Flowsheet einer Batch-Einzelproduktanlage [4] (grau, Änderungen für externe Erwärmung und Kühlung)





2
Gantt-Diagramm des bestehenden Prozesses (b) mit externer Erwärmung/Kühlung, und Hervorhebung der Zeitintervalle und der Ströme eines Arbeitszyklus

pende Batches). Die minimale Zyklusdauer (Zeitspanne zwischen dem Beginn zweier aufeinanderfolgenden Batches) wird von derjenigen Komponente bestimmt, welche die grösste Auslastung besitzt, in diesem Fall der Reaktor R2. Dieser Reaktor stellt den Engpass dar (Bottleneck), da sein Auslastungsgrad bei 100%, bei einer Zyklusdauer von 335 Minuten, liegt.

Grundregel: externe Abkühlung und Erwärmung [4]

Aus Bild 2a ist ersichtlich, dass 46% (155 Min.) der Zeit für die Erwärmung und Abkühlung des Reaktors R2 aufgebracht wird. Da die Doppelmantelreaktoren einen niedrigen Wärmeübertragungskoeffizienten aufweisen, könnten diese Etappen effizienter durch externe Wärmeübertrager beim Füllen oder Entleeren des Reaktors gemacht werden. Diese einfache Regel ermöglicht eine Reduktion der Zyklusdauer (Erhöhung der Produktion bzw. eine Steigerung der Produktivität des Personals - häufig erstrebte Ziele) und erhöht gleichzeitig die Möglichkeiten für die Energieintegration. Ein weiterer Vorteil ist die Abflachung des Reaktortemperaturzyklus.

Die benötigten externen Wärmeübertrager sind in Bild 1 grau gefärbt eingezeichnet. Mit diesen Änderungen kann die Zyklusdauer auf 195 Minuten reduziert werden. Dies ist in Bild 2b dargestellt.

Batch-Stromtabelle und Integrationsarten

In Tabelle 1 (Bild 3) werden die Ströme aufgelistet, welche einer Zyklusdauer des Prozesses mit den in Bild 2b dargestellten Bedingungen entsprechen (überlappende Batches). Im Gegensatz zu einem kontinuierlichen Prozess existieren die Batch-Ströme während einer beschränkten Dauer. Die Zeitpunkte des Erscheinens (t_{start}) oder des Verschwindens (t_{stop}) der Ströme teilen hier einen Zyklus in sieben aufeinanderfolgende kontinuierliche Teilprozesse. Mehrere Prozessintegrationsarten können angewandt werden:

- direkte Wärmeübertragung zwischen gleichzeitig existierenden Strömen, z.B. die Ströme KS2 und WS3 während der Zeitintervalle 1, 2 und 7
- mittels der vorhandenen Energieversorgungsnetze
- indirekte Wärmeübertragung zwischen Strömen, welche nicht zur selben Zeit vorhanden sind, durch Speicherung einer Drittflüssigkeit, z.B. zwischen den Strömen KS3 und WS1 bei einer Zwischenspeicherung bei 40 bis 95 °C
- Rescheduling des Prozesses (Veränderung der Zyklusdauer, Vorausnahme/Verzögerung der Ströme ausserhalb des kritischen Weges), um die Simultanität einzelner Ströme zu erhöhen. Temporäre Speicherung eines Produktes in einer Anlagekomponente, um den Strom zu verzögern
- Veränderung (T, P usw.) der Prozesse (nach dem Plus-/Minus-Prinzip [1]).

Diese Integrationsarten können miteinan-

der kombiniert werden. Die besondere Schwierigkeit liegt darin, die optimale Mischung für den gegebenen Prozess zu finden. Die wichtigsten Werkzeuge und Analyse- bzw. Synthesemethoden werden weiter unten vorgestellt. Tabelle 2 (Bild 8) soll den Vergleich und die Auswahl erleichtern.

Theoretischer minimaler Energieverbrauch: das TAM [3]

Das TAM (Time Average Model) betrachtet ein Batch-Verfahren als ein kontinuierliches Verfahren (d.h., es weist dieselben Energie-Verbundkurven auf). Die Leistung jedes Stromes wird über die Zyklusdauer gemittelt. Die Leistung von Strom KS1 (Bild 3) beispielsweise beträgt:

$Q_{KS1} = 611\ kW \cdot [(30 - 0)/60]\ h/batch = 305{,}5\ kWh/batch$

Das TAM vernachlässigt die zeitlichen Belange. Die TAM-Verbundkurven ergeben mit einem «vernünftigen» Pinch (Experimentalwert in Funktion des Prozesstypes) den unteren Grenzwert des Wärme- bzw. Kälteverbrauches sowie die globale Pinchtemperatur.

Bild 4 zeigt die TAM-Verbundkurven (in Energie) des Prozesses für einen Pinchwert von 15 °C. Die energetischen Zielsetzungen für diesen stark exothermen Prozess sind:

- Wärmezufuhr: 0 kWh
- Kälteabfuhr: 1528 kWh

Direkte Wärmeübertragung: das TSM [3]

Im Gegensatz zum TAM berücksichtigt das Modell der Zeitintervalle (Time Slice Model, TSM) das Schedule des Prozesses und bezieht damit nur die effektiv möglichen, direkten Wärmeübertragungen ein. Jedem Zeitintervall (Bild 2b) entspricht ein Verbundkurvenpaar; auf diesen Verbundkurven entsprechen die internen Wärmeübertragungen den direkten Wärmeübertragungen, da die aufgezeichneten Prozessströme gleichzeitig existieren. Die Summe der energetischen Zielsetzungen auf den n Abschnitten der Zyklusdauer entspricht der energetischen Zielsetzung des TSM. Bild 5 beispielsweise stellt die Verbundkurven des ersten der sieben Zeitintervalle dar, welche ein wichtiges Potential an direkter Wärmeübertragung aufweisen (517 kWh von total 1017 kWh). Die TSM-Zielsetzungen lauten:

- Wärmezufuhr: 1163 kWh
- Kälteabfuhr: 2692 kWh

Name	Batch	Prozessstrom	Temperaturen Eintritt [°C]	Temperaturen Austritt [°C]	Wärmekapazitätsströme [kW/°C]	Wärmeleistung [kW]	Zeit Anfang [min]	Zeit Ende [min]
KS1	n	Zufuhr. Heizen	10	60	12,22	611	0	30
KS2	n-1	Destillation. Kocher	119	120	452,5	453	0	120
KS2	n	Destillation. Kocher	119	120	452,5	453	185	195
WS1	n-1	Destillation. Kondensator	111	110	403,8	-404	0	120
WS1	n	Destillation. Kondensator	111	110	403,8	-404	185	195
WS2	n-1	Destillation. Unterkühler	110	50	0,77	-46	0	120
WS2	n	Destillation. Unterkühler	110	50	0,77	-46	185	195
KS3	n-1	Zufuhr B. Vorheizen	15	78	22,42	1412	140	170
KS4	n-1	Reaktor 2. Nachheizen	74	95	35,8	752	170	185
WS3	n-2	Rückfluss. Kondensator	135	134	918	-918	0	80
WS3	n-1	Rückfluss. Kondensator	135	134	918	-918	185	195
WS4	n-2	Produkt. Kühlen	140	35	19,375	-2034	80	120

3
Stromtabelle entsprechend einer Zyklusdauer des Prozesses

Vergleich TAM – TSM

Der Vergleich, bei gleichem Pinch ΔT_{min}, der energetischen Ziele von TAM und TSM ist ein nützlicher Indikator für die Fortsetzung der energetischen Analyse: ein grosser relativer Unterschied zwischen den energetischen Zielen der beiden Modelle beispielsweise führt den Ingenieur dazu, entweder ein Rescheduling des Prozesses durchzuführen, um die direkte Wärmeübertragung zu fördern, oder auf die Speicherung von Wärme zurückzugreifen, oder beide Möglichkeiten miteinander zu vermischen. Die dafür benötigten Werkzeuge sind die Cascade Analysis und die Batch Utility Curves (siehe weiter unten).

Für den untersuchten Prozess sind die Ziele von TSM (Wärme: 1163 kWh; Kälte: 2692 kWh) um 1163 kWh höher als die Ziele von TAM (Wärme: 0 kWh; Kälte: 1528 kWh). Dieser Unterschied entspricht dem Potential der Wärmerückgewinnung durch indirekte Wärmeübertragung (53%), die direkte Wärmeübertragung entspricht 1017 kWh (47% des Gesamtpotentials).

Direkt, indirekt, Rescheduling: qualitative Auswahlkriterien

Es ist nicht offensichtlich, die beste Option zu bestimmen, auch wenn oft die Zielsetzungen sowie die auferlegten Einschränkungen bestimmte Lösungen erzwingen. Je nach den vorhandenen Strömen, den zur Verfügung stehenden Anlagekomponenten, der gewünschten Flexibilität oder der Variabilität des Schedule der Ströme kann ein Rescheduling (mit Speicherung eines Stromes) vorgezogen oder mittels der indirekten Wärmeübertragung über eine gespeicherte Drittflüssigkeit durchgeführt werden.

Im einzelnen ist es sinnvoll, die Machbarkeit der wichtigsten direkten Wärmeübertragungen, welche durch die Verbundkurven des TSM vorgegeben wurden, abzuklären. Gewisse Wärmeübergänge können aus praktischen Gründen ausgeschlossen werden (Inkompatibilität der Ströme, starres Schedule nicht mit der gewünschten Flexibilität übereinstimmend, usw.). In diesen Fällen müssen diese Wärmeübergänge ausgeschlossen oder als indirekte Übertragungen eingebettet werden. Es ist im weitern auch von Bedeutung, ob sich die Integration auf viele kleine Wärmeübertragungen oder auf wenige, energetisch wichtige Ströme verteilt. Die Existenz wichtiger speicherfähiger Ströme (z.B. Warmwasser in einer Brauerei) ermöglicht oft eine erleichterte Integration.

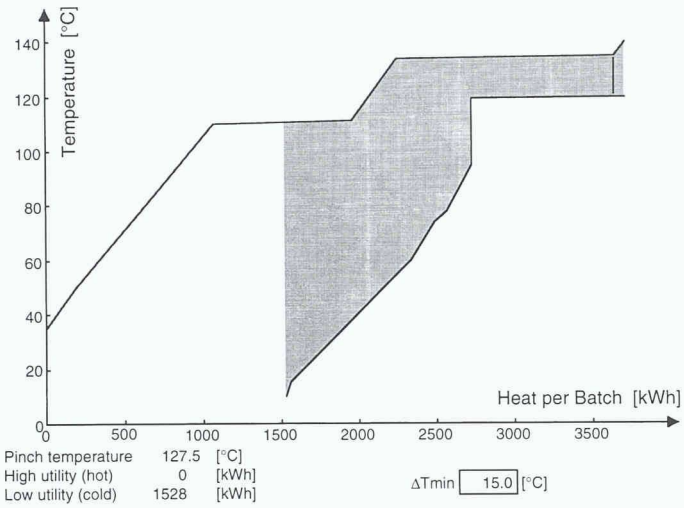
Verbesserte Modellierung

Im Stadium der Voranalyse werden die Ziele des TSM für einen einzelnen Pinch ΔT_{min}, welcher mit demjenigen des TAM übereinstimmt, berechnet. Für eine verfeinerte Analyse, z.B. vor der Planung einer Einproduktanlage, ist es entscheidend, den wirtschaftlich optimalen Pinch $\Delta T_{min}k$ für jedes Zeitintervall k zu bestimmen.

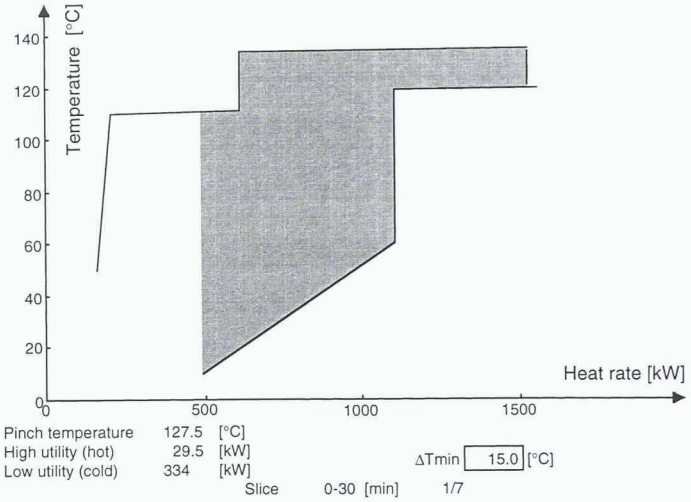
Die gefundenen Lösungen sind im allgemeinen wirtschaftlich und energetisch interessanter [6]. Der Entwurf des Wärmeübertragungsnetzwerkes ist jedoch besonders aufwendig. Es werden zurzeit Entwicklungsarbeiten durchgeführt, welche durch Vereinfachung des Vorganges die praktische Anwendung ermöglichen sollen.

Cascade Analysis und Batch Utility Curves

Falls sich aus der Voranalyse ein signifikanter Unterschied zwischen den Zielen der TAM und der TSM ergibt (d.h. begrenzte Wärmeübertragungsmöglichkeiten resultierend aus einem kleinen Grad an



4
Energie-Verbundkurven TAM



5
Verbundkurven TSM des ersten Zeitintervalles

Simultanität der Ströme), wird eine Analyse der Gelegenheiten von Rescheduling oder von Wärmespeicherung notwendig. Wie sollte man die Analyse nun weiterführen, die Möglichkeiten des Rescheduling oder die Speicherung nutzen?

Es ist möglich, die Cascade Analysis [3] als Tabellendarstellung der Energiebilanz in bezug auf die Temperatur und für die verschiedenen Zeitintervalle anzuwenden. Diese Methode ist relativ einfach zu handhaben, wenn ein Tabellenkalkulationsprogramm zur Verfügung steht, und sie ermöglicht die Bestimmung der Energien, welche in der Temperatur- (direkte Wärmeübertragung) und/oder der Zeit-«Kaskade» (indirekte Wärmeübertragung) nacheinandergekoppelt werden können. Mit der Cascade Analysis wird die Bestimmung der Möglichkeiten des Rescheduling erleichtert. Die Auswertung der Zahlentabelle (Matrix 12 mal 7 für den Prozess in Bild 1) ist schwierig durchzuführen; eine globale graphische Darstellung wird deshalb vorgezogen.

Diese Repräsentationsform wird durch die Batch-Kaskaden-Verbundkurven (BKV) gegeben (Batch Utility Curves [4], oder auch Batch Cascade Curves). Die warme BKV enthält den über den ganzen Zyklus durch direkte Wärmeübertragung nicht erfüllten Anteil des benötigten Kältebedarfes. Desgleichen stellt die kalte BKV denselben Anteil an der Wärmezufuhr dar. Im Gegensatz zur Cascade Analysis, welche einen einheitlichen Pinch ΔT_{min} für alle Zeitintervalle voraussetzt, kann mit den BKV diese Einschränkung umgangen werden. Die BKV sind vielfältig anwendbar:

- Wie beim TAM können die BKV für die Bearbeitung des Prozesses nach dem Prinzip Plus/Minus [1] verwendet werden.
- Nachdem der Ingenieur mit Hilfe des Gantt-Diagramms die wichtigsten Ströme bestimmt hat, können die Veränderungen des Schedule, mit dem die Synchronisierung der wichtigsten warmen Ströme zu den kalten Strömen erreicht wird, vorgenommen werden. Es gibt dazu aber keine generelle Methode. Eine Analyse jedes aussichtsreichen Falles ist im einzelnen nötig.
- Die BKV erlauben eine Vorauswahl der Wärmespeicherungssysteme (Anzahl Speicher und Arbeitstemperaturen) sowie der nützlichsten Temperaturebenen der Wärmequellen.

Bild 6 veranschaulicht die Batch-Kaskaden-Verbundkurven des Prozesses bei einem Pinch von ΔT_{min}=15 °C (wie bei der direkten Wärmeübertragung). Hinsichtlich des Rescheduling des Prozesses ist diese Wahl angebracht; für die indirekte Wärmeübertragung über einen Zwischenspeicher muss jedoch ein höherer Pinch gewählt werden (siehe unten, theoretisch $2 \cdot \Delta T_{min}$ desjenigen des direkten Wärmeübergangs, also 30 °C). Die Temperaturbereiche, bei welchen die BKV während der verschiedenen Zeitintervalle Wärme aufnehmen oder abgeben können, sind ebenfalls durch horizontale Pfeile dargestellt (time slice TS). Diese zusätzlichen Hinweise (neben Fliessbild, Gantt-Diagramm) erleichtern sowohl die Suche nach Rescheduling-Möglichkeiten als auch die Vorauswahl der Wärmespeicherungen nach den Kriterien. Das Einbeziehen der verschiedenen Einschränkungen und im speziellen der relativen Dauer der Zeitintervalle (bei gleicher Gesamtenergie entsprechen die langen Zeitabschnitte den Wärmeübertragern kleiner Leistung) führt dazu, dass die Wärmeübertragung nicht unbedingt vertikal geführt werden muss.

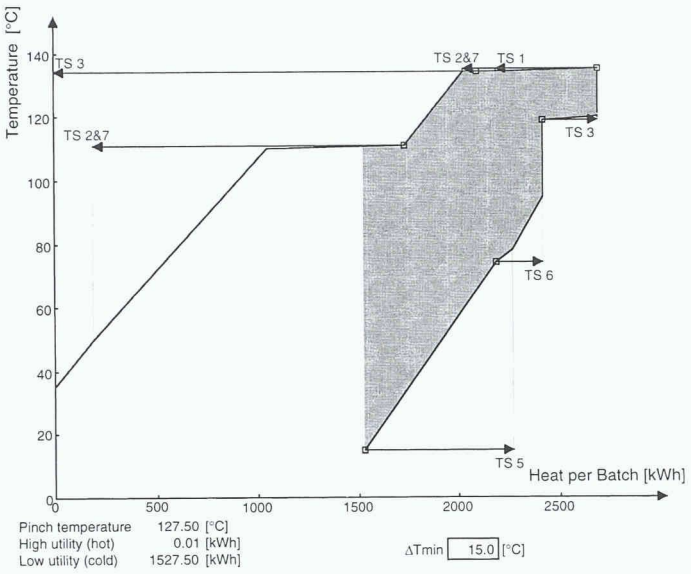
Änderungen der Prozesse

Bei guter Kenntnis des Prozesses (Voraussage der möglichen Einflüsse auf die Qualität des Produktes, auf das Schedule usw.) können Änderungen auf verschiedenen Ebenen eingeplant werden, z.B. Wahl eines anderen Reaktions-Trennungsweges, Änderung der Arbeitstemperatur oder des Arbeitsdruckes einer Kolonne, Verhindern einer nicht isothermen Vermischung beim Füllen der Reaktoren. Im Falle einer Sanierung können diese Änderungen nicht alle angewandt werden. Das Rescheduling bildet auch eine Form der Prozessänderung.

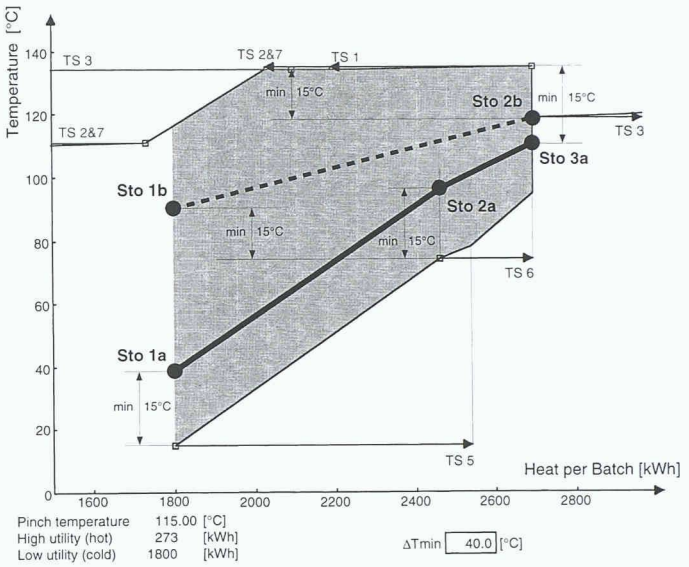
Rescheduling und Debottlenecking der Prozesse

Die Eingriffe in Form des Rescheduling erlauben oft einen grossen Anteil des Einsparpotentials preiswert zu realisieren. Für die Synchronisierung eines warmen und eines kalten Stroms können mehrere Lösungswege untersucht werden: Veränderung der Zyklusdauer, die aber ziemlich begrenzt ist (Anfälligkeit auf Propagation der Verspätungen auf dem kritischen Weg [5], unerwünschte Verlängerung der Zyklusdauer usw.). Die Synchronisierung durch Speicherung eines der beiden Ströme ist toleranter auf Abweichungen des Ablaufplanes, ohne dabei ein neues Speichervolumen zu benötigen (z.B. die Reaktoren, welche keinen Engpass bilden und welche einen leichten Vorsprung auf die Füllung oder Verspätung auf das Entleeren erlauben).

Die BKV in Bild 6 führen dazu, mehrere Möglichkeiten des Rescheduling in Betracht zu ziehen. Die Integration des



6
Batch-Kaskaden-Verbundkurven (BKV) des Prozesses



7
Plazierung der Speicher auf den Batch-Kaskaden-Verbundkurven

Stromes KS3 des Zeitintervalls 5 mit dem Strom WS4 des Intervalls 3 verlangt beispielsweise entweder WS4 zu verzögern oder KS3 vorzuziehen. Eine zusätzliche temporäre Speicherung ist in beiden Fällen nötig, da der Reaktor R2 schon den Engpass (Bottleneck) darstellt. Eine andere Lösung bestünde darin, denselben Strom KS3 entweder mit dem Strom WS1 (Destillationskondensator, Intervalle 2&7) oder mit dem Strom WS3 (Rückflusskondensator, Intervalle 1 und 2&7) zu integrieren; diese Lösung ist jedenfalls nur möglich, wenn KS3 ohne Abbaurisiko im voraus auf 78 °C aufgewärmt und gespeichert werden kann, da die Ströme WS1 und WS3 nicht verzögert werden können.

Die Energieeinsparung ist selten die prioritäre Zielsetzung. In der Tat sind die Vorteile resultierend aus der Verkürzung der Zyklusdauer durch Rescheduling bzw. Debottlenecking oft bedeutender als die Energiekosteneinsparung. Dies bestätigt die einfachen Regeln wie die externe Vorwärmung während des Füllens des Reaktors, bzw. die Abkühlung während des Entleerens. Die Reduktion der Zyklusdauer ist oft geringer, führt aber generell zu einem besseren Preiseinsparverhältnis als das Einfügen eines neuen, parallel arbeitenden Reaktors. Letzteres erfordert hohe Ausgaben und erlaubt oft keine entsprechende Steigerung der Produktionskapazität, da ein neuer Engpass bei einer anderen Einheit entstehen kann [2], [4].

Beim untersuchten Prozess führen die externe Vorwärmung und Abkühlung zu einer Verkürzung der Zyklusdauer von 42% (Produktionskapazitätssteigerung von 72%). Im Gegensatz dazu die traditionelle Lösung, bei welcher ein zusätzlicher Reaktor R2 eine Steigerung der Produktionskapazität von 49% erbringen würde. Die Zyklusdauer wäre dann vom Reaktor R1 abhängig (225 Minuten ohne externe Vorwärmung).

Wärmeübertragung mittels Zwischenspeicherung

Nachdem die Möglichkeiten des Rescheduling ausgeschöpft worden sind, sollte die Wärmespeicherung untersucht werden. Diese flexiblere Lösung benötigt jedoch zusätzliche Wärmespeicher und für den gleichen Energieübergang und denselben Pinch ΔT_{min} eine viermal grössere Übertragungsfläche (zwei in Serie geschaltete Wärmeübertrager mit einer halbierten Temperaturdifferenz). Das Problem liegt nun, basierend auf den BKV, bei der Bestimmung von:

- Anzahl und Typ der Wärmespeicher (z.B. konstante Temperatur und variables Volumen),
- dem Temperaturniveau jedes Speichers,
- dem Beitrag (Zu- bzw. Abfuhr von Wärme) während jedes Zeitintervalls zu bzw. von jedem Speicher,

um das gewünschte wirtschaftliche Optimum zu erreichen (siehe auch [6]).

Die Ausgangsgrössen können mittels einiger einfacher Regeln bestimmt werden. Bei zwei Speichern (mit konst. T/var. Vol.), arbeitend bei T_{kalt} bzw. T_{warm} ist das Bestimmungsprinzip wie folgt:

- Der Wärmeüberschuss eines Intervalls wird an die Speicherflüssigkeit weitergegeben und erwärmt diese von T_{kalt} zu T_{warm} (Einführung eines kalten Stromes während dieses Intervalls);
- Während eines nachfolgenden Zeitabschnitts erfolgt der umgekehrte Wärmeübergang vom Speicher weg und kühlt die Flüssigkeit wieder von T_{warm} zu T_{kalt} und speist diese Energie bei einem Zeitintervall mit Wärmedefizit zurück in den Prozess (Einführung eines warmen Stromes während dieses Intervalls);
- Eine Speicherung bei einer Zwischentemperatur wird nötig, wenn die extremen Temperaturwerte T_{warm} bzw. T_{kalt} nicht erreicht werden können (unter Berücksichtigung vom Pinch ΔT_{min});
- Um die Wärmeübertragungsflächen zu minimieren, muss die Speicherung so gewählt werden, dass die Verbundkurve in der mittleren Höhe zwischen den entsprechenden kalten und warmen BKV zu liegen kommt. Um die Speichervolumen zu minimieren, muss der Temperaturunterschied zweier angrenzender Speicher so gross wie möglich sein. Die optimale Lösung ist ein Kompromiss der beiden Kriterien und hängt vom Verhältnis zwischen den Kosten der Wärmeübertrager und jener des Speichervolumens ab.

Bild 7 zeigt die Anwendung dieser Regeln, bei einem Pinch von mindestens 30 °C (Anwesenheit einer Unstetigkeit von 16 bis 40 °C). Die Machbarkeit direkter Wärmeübertragungen während der verschiedenen Zeitintervalle wird vorausgesetzt, und die Massnahmen eines eventuellen Rescheduling müssen bereits implementiert worden sein, damit diese Verbundkurven nur noch die Ströme beinhalten, welche lediglich mittels Zwischenspeicherung übertragen werden können. Die Speicher (Sto) sind mittels eines Punktes bei der entsprechenden Arbeitstemperatur dargestellt; die Ströme zwischen diesen Speichern bilden eine dazwischenliegende

Methoden und Werkz.	Quelle	Kategorie:				Anwendungsgebiet:								Auswertung:				
		Allgemein	Pinch-Methode	Mathematische Programmierung	Kombinatorisch	Allgemein	Prozessänderung	direkte Wärmeübertragung	Energieversorgungsnetze	Rescheduling	Zwischenspeicherung	Scheduling Mehrproduktanlagen	Debottlenecking	Anwendungskomplexität	Leistungsstärke	Anzahl Ströme	Anzahl Zeitintervalle	Gleichzeitigkeit der Ströme
Fliessbild des Prozesses		•				•												
Gantt Diagramm (Time Event Chart)	[4],[5]	•				•		•		•			+	S-M				
Plus/Minus	[1]		•				++							M				
externe Wärmung und Kühlung	[4]	•				•							++	S				
TAM Modell	[3]		•			•								S				
TSM Modell	[3]		•					++						M				
Optim. Temperaturdiffer. (ΔTmin k)	[6]		•					++						L	L	M	S-M	
Cascade Analysis	[3]		•			•				+	+			S	M	M	S-M	
BKV (Batch Utility Curves)	[4],[5]		•				+		+	+	++			M				
Speicherwahl	[6]		•								++			M	M			
STN Modell	[7]			•				++		++	++	++		XL	M			
OMNIUM	[8]				•			++						M	M	M	L	L
PERMUTATIONSMETHODE	[9]				•						++			M	M	M		S

Investitionskosten	+/-	+/-	++	++	--
Flexibilität	o	--	++	+/-	++
Wärmerückgewinnung	++	+/-	-	+	+
Machbarkeit	+/-	-	-	+/o	+

Zeichenerklärung:
S = gering ; M = mittlere ; L = gross ; XL = sehr gross
++ = sehr gut / vorteilhaft / geeignet ; + = gut / günstig ; o = wirkungslos ; - = negative Wirkung ; -- = besonders negative Wirkung

8
Eigenschaften und Vergleich der Batch-Energieintegrationsmethoden

Verbundkurve sowohl kalt (Ladungsphase) oder warm (Entladungsphase).

Es sind generell mehrere Speicheranordnungen möglich. Das vorliegende System bestehend aus den Speichern (Sto1b, Sto2b) zeigt eine Mindestanzahl an Speichern, aber die Speichervolumen werden ohne Zweifel beträchtlich sein (die hohe Temperatur von Sto1b wird vom Zeitintervall 6 vorgegeben). Das Gesamtvolumen der Variante (Sto1a, Sto2a, Sto3a) wird sicherlich kleiner ausfallen, verteilt sich aber auf drei Speichereinheiten, um die maximale Energieübertragung zu ermöglichen. Die praktische Zielsetzung wird jedoch auf eine wirtschaftliche Optimierung hinsteuern (Verhältnis Einsparung/Kosten). Es müssen somit allerlei mögliche Kompromisse eingegangen werden, indem beispielsweise der Bedarf des Zeitintervalles 6 (188 kWh) nicht erfüllt wird und somit zwei Speicher genügen würden. Im konkreten Fall ergeben sich die Möglichkeiten einer Integration des Stromes KS3 entweder mit WS1 oder mit WS3 oder auch mit WS4 (es wird angenommen, dass weder KS3 noch WS4 warm gespeichert werden können, da es zu Problemen mit der Stabilität führen kann; eine Integration mittels Rescheduling ist somit nicht möglich).

Nach der Bestimmung der Anzahl Speicher und ihrer Arbeitstemperatur müssen die jedem Zeitintervall k entsprechenden, optimalen Energiemengen bestimmt werden, welche den Speichern zugeführt oder entzogen werden müssen, um minimale Jahreskosten der Energieleistungen zu erreichen (Optimierung des Pinchwertes ΔT_{min} k). Diese Vorgehensweise ist fortgeschritten (aber auch aufwendig) und wird vorzugsweise bei Batch-Prozessen angewandt, welche eine Vielzahl an Strömen aufweisen, aber deren Zeitintervalle wenige sind. Bei weniger komplexen Systemen, wie dies hier der Fall ist, können direkt konkrete Lösungsvorschläge untersucht werden (wie z.B. die oben erwähnten), und es wird auf eine komplette Analyse verzichtet. Die Permutationsmethode (siehe unten) ermöglicht ebenfalls, die Wärmeübertragung mittels Speicherung zu analysieren.

Mathematische Methoden

Das kombinatorische Wesen der Integrationsprobleme für Batch-Prozesse sollte eigentlich Lösungsansätze der mathematischen Programmierung vorziehen. Ein interessanter Ansatz [7] wird für das optimale Scheduling der Mehrzweckanlagen (mit Einbezug der Möglichkeiten der energetischen Integration) vorgeschlagen, indem eine Darstellung des Prozesses, genannt Zustand-Auftrag Netzwerk (State-Task Network, STN), gewählt wird. Beschränkt man sich auf direkte Wärmeübergänge, so kann das Problem durch ein MILP (Mixed Integer Linear Programming) beschrieben werden; die Erweiterung mit indirekten Wärmeübergängen (mittels Wärmespeicherung) verwandelt dieses in ein nichtkonvexes MINLP (Mixed Integer Non Linear Programming).

Im einfachen Beispiel der Integration eines Reaktors mit einer Batch-Destillationskolonne kann das MILP-Problem leicht mit einem kommerziellen Solver, welcher die Branch and Bound-Methode verwendet, gelöst werden, während das Lösen des nichtkonvexen MINLP gute Kenntnisse des Problems und den Einsatz fortgeschrittener Lösungsalgorithmen voraussetzt. Dieser mathematische Ansatz ist, zumindest in der Theorie, sehr leistungsstark, da eine Vielzahl an Parametern in die Optimierung einbezogen werden kann. Im praktischen, industriellen Umfeld kann das MINLP jedoch noch nicht eingesetzt werden, weil für die Formulierung dieses mathematischen Problems benutzerfreundliche und dennoch robuste Programme auf dem Markt nicht erhältlich sind. Das Leistungspotential dieser Methode, nicht nur für die Prozessintegration, sondern auch für das Scheduling und die Zuweisung der Aufträge jeder einzelnen Anlagenkomponente, kann eine schnelle Anwendungsbereitschaft erhoffen lassen.

Es bestehen andere Methoden, häufig weniger allgemeine, welche verschiedene spezifische Probleme zum Scheduling (Mehrproduktstrassen [5] usw.) lösen können. Diese Methoden beinhalten oft nicht ausschliesslich mathematische Algorithmen, aber auch gewisse vereinfachende intuitive Regeln.

Omnium- und Permutationsmethode

Die Omnium- [8] und die Permutationsmethode [9] sind kombinatorische Methoden, welche auf vereinfachenden Annahmen basieren, die es erlauben, das Lösungsgebiet einzuschränken. Zielsetzung ist, auf möglichst automatisierte Weise (d.h. so wenig Benutzereingriffe wie möglich) und mit wenig Zeitaufwand zu einer guten Lösung zu gelangen.

Omnium ist speziell geeignet für die Energieintegration von Produktionseinrichtungen, die diskontinuierlich und mit wechselnder Auslastung betrieben werden, und welche häufig in klein- und mittelständischen Industriebetrieben zu finden sind. Die maximale Wärmerückgewinnung wird für jedes mögliche Strompaar (d.h. warmer Strom - kalter Strom) berechnet. Omnium sucht dann unter allen Kombinationen exklusiver Strompaare jene, welche (durch direkte Wärmeübertragung) die grösste globale Wärmerückgewinnung aufweist. «Exklusive Strompaare» bedeutet, dass es maximal einen

Wärmeübertrager pro Strom geben kann. Die kombinatorische Optimierung wird mit einem abgeänderten ungarischen Lösungsalgorithmus durchgeführt. Die Software ist auf dem Markt erhältlich. Bis heute werden die indirekten Wärmeübertragungen nicht berücksichtigt. Die berechneten Lösungen können relativ weit vom Optimum entfernt liegen (z.B. bei niedrigem Simultanitätsgrad und ungeeigneten Wärmeleistungsverhältnissen der Ströme).

Im Gegensatz dazu setzt die Permutationsmethode voraus, dass alle Wärmeübertragungen über Zwischenspeicher (des Typs konst. T/var. Vol.) erfolgen. Die möglichen Speichertemperaturen werden aufgrund der Initial- und Endtemperaturen jedes Stromes ausgewählt. Bei einer vorgewählten Anzahl Wärmespeicher berechnet ein Algorithmus aus den erfolgsversprechendsten Zusammenstellungen das vorgegebene wirtschaftliche Kriterium. Diese Auswahl der Zusammenstellungen erfolgt aus einfachen intuitiven Regeln (nur ein Prozesswärmeübertrager pro Strom usw.). Die Erfahrung zeigt, dass schon bei einer kleinen Anzahl Wärmespeicher und einem einfachen Wärmeübertragungsnetz eine wirtschaftliche und flexible Energieintegration zu erreichen ist (obwohl die Lösungen durch die Betrachtung der Prozessverbundkurven noch leicht verbessert werden können). Die Methode ist jedoch relativ ineffizient für Prozesse mit mittlerer bis hoher Simultanität der Ströme. Das Programm Comstore ist kommerziell noch nicht erhältlich.

Diese beiden pragmatischen Methoden weisen teilweise komplementäre Anwendungsbereiche auf. Die gefundenen Lösungen liegen meist nur in der Nähe des Optimums; dies stellt aber im industriellen Umfeld meist kein Nachteil dar, da die globale, optimale Lösung aufgrund vieler Einschränkungen in der Praxis meistens nicht erreicht wird.

Überblick

Die zweite Tabelle (Bild 8) fasst die Eigenschaften der Werkzeuge und der Methoden dieses Beitrages zusammen. Sie basieren auf relativ einfachen Konzepten und haben sich in der Praxis bewährt; sie bilden schon heute das Fundament für die Beherrschung der energetischen Integration, im speziellen bei Einproduktanlagen.

Die effiziente Handhabung dieser Lösungsalgorithmen setzt beim Ingenieur gute Kenntnisse des Prozesses und der Anlagekomponenten voraus, dazu kommen Know-how und Erfindungsgabe. Diese Expertise ist entscheidend, um die erfolgsversprechendsten Lösungen innert nützlicher Frist ausfindig machen zu können. Ohne Zweifel liegt die Schwierigkeit teilweise in der kombinatorischen Dimension des Problems, d.h. in der grossen Anzahl Möglichkeiten, die zur Verfügung stehen und berechnet werden müssten. Dieses nötige Zusammenspiel macht eine Automatisierung der verschiedenen Schritte durch ein Programm schwierig. Die oben gezeigten Werkzeuge werden generell nicht systematisch und linear angewandt, vielmehr parallel und sehr interaktiv.

Damit eine bessere und einfachere Handhabung möglich ist, müssen die Methoden noch weiter verfeinert werden. Ihr Zusammenspiel (speziell zwischen der Pinchmethode und der mathematischen Programmierung) kann im praktischen Umfeld ausgenützt werden. Fallstudien und auch systematische Vergleichsuntersuchungen müssten dazu führen, dass die respektiven Leistungseigenschaften der verschiedenen Methoden (Rechendauer, Anzahl benötigter Angaben, Wert der gerechneten Lösungen) besser ermittelt werden können. Angepasste Auswahlkriterien für die zu wählenden Methoden sollten zudem besser für einen gegebenen Problemfall formuliert werden können. Auf diesem Gebiet laufen zurzeit Forschungsarbeiten an der ETH Lausanne (im Auftrag des BEW).

Eine stark automatisierte Integrationssoftware für den allgemeinen Anwendungsbereich kann vorerst nicht ins Auge gefasst werden. Man konzentriert sich darauf, möglichst benutzerfreundliche Software anzubieten, welche die Anwendung der verschiedenen Werkzeuge der energetischen Prozessintegration erleichtern soll. Da enge Zusammenhänge zwischen der Integration und der Prozessauslegung, seinem Schedule, der Anlagekomponenten, der Flexibilität usw. (die prioritären Zielsetzungen sind selten energetischer Natur) bestehen, sind Programme nötig, welche die Verknüpfung dieser verschiedenen Aspekte zu hoher Effizienz der Lösungsfindung auszunützen wissen. Bedeutende Fortschritte in dieser Richtung wurden bisher erreicht [5]. Eine Optimierung der Energieintegration, z.B. «eingeschlossen» in einem Produktionsführungsprogramm, besteht noch nicht und wäre nur für speziell zu diesem Zweck entwickelte Programme denkbar.

Adresse des Verfassers:
Pierre Krummenacher, ing. EPFL/SIA, Laboratoire d'énergétique industrielle - EPFL-DGM-LENI, 1015 Lausanne

Literatur

[1]
Linnhoff, B.: Use Pinch Analysis to Knock Down Capital Costs and Emissions. Chemical Engineering Progress, August 1994, pp. 32-57

[2]
Linnhoff, B., Ashton, G.J., Obeng, E.D.A.: Process Integration of Batch Processes. IChemE Symposium Series, No. 109, March 1988, pp. 221-237

[3]
Kempe, I.C., Deakin, A.W.: The Cascade Analysis for Energy and Process Integration of Batch Processes. Chem Eng Res Des, Vol. 67, September 1989, pp. 495-525

[4]
Gremouti, I.D.: Integration of Batch Processes for Energy Savings and Debottlenecking. MSc Thesis at Department of Chemical Engineering, University of Manchester Institute of Science and Technology (UMIST), August 1991, U.K.

[5]
Klemes, J. (Coordinator) & al.: Design and Operation of Energy Efficient Batch Processes. Final Report Contract No JOUE - 0043 - C(SMA), JOULE R&D Programme, UMIST, February 1994, Manchester, U.K.

[6]
Krummenacher, P., Favrat, D.: Intégration énergétique de procédés industriels par la méthode du pincement étendue aux procédés discontinus, rapport final du mandat OFEN EF-PROC(92)037, Septembre 1995, EPFL-DGM-LENI, Lausanne

[7]
Papageorgiou, L.G., Shah N., Pantelides, C.C.: Optimal Scheduling of Heat-Integrated Multipurpose Plants. Ind. Eng. Chem. Res, Vol. 33, No. 12, 1994, pp. 3168-3186

[8]
Hellwig, T., Thöne, E.: Omnium: Ein Verfahren zur Optimierung der Abwärmenutzung, BWK (Brennstoff, Wärme, Kraft) Band 46, September 1994, Nr. 9, pp. 393-397

[9]
Stoltze, S., Mikkelsen, J., Lorentzen, B., Petersen, P.M., Qvale, B.: Waste-Heat Recovery in Batch Processes Using Heat Storage. Transactions of the ASME, Vol. 117, June 1995, pp. 142-149