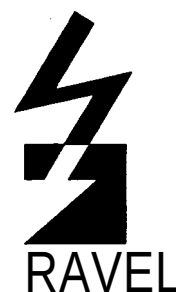


Materialien zu RAVEL

Zukunftsweisende Planungshilfen für Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung

Begleitheft zur
RAVEL-Veranstaltung 352

Robert Brunner
Daniel Favrat
Nicolas Mathys
Raymond, Morand
Hanspeter Pfenninger
Frederic Staine



Impulsprogramm RAVEL
Bundesamt für Konjunkturfragen

Vorwort

Die RAVEL-Veranstaltung "Zukunftsweisende Planungshilfen für Wärmerückgewinnung und **Abwärmenutzung**" hat zum Ziel, wenig bekannte Planungshilfsmittel einem grösseren Publikum näher zu bringen. Das vorliegende Heft fasst die drei Referate der obigen Veranstaltung zusammen.

Der Einstieg erfolgt in Kapitel 1 mit der Vorstellung einer allgemein bedienbaren Eingabe für das Gebäudesimulationsprogramm DOE-2. Dem Praktiker wird damit der Zugang zu einem klassischen Simulationsprogramm, das bis anhin nur vom Spezialisten bedient werden konnte, geöffnet, ohne dass er sich mit mehr als den heute üblichen PC Allgemeinwissen auseinandersetzen muss.

Im zweiten Kapitel werden die Grundlagen der Pinch-Design-Methode dargelegt. Der Stoff beruht im wesentlichen auf der deutschen Kurzfassung im RAVEL-Dokument **724.321f** 'Integration **énergétique** de **procédés** industriels **par la méthode** du pincement" der Autoren D. Favrat und F. Staine des LENI-DGM-EPF-Lausanne. Sie wurde redaktionell überarbeitet und wo nötig ergänzt.

Im dritten Kapitel wird die Umsetzung der PDM in die Praxis am realen Beispiel der Faserzementplatten-Herstellung demonstriert. Die Anwendung in der Praxis erfordert Erfahrung und kann nicht 1:1 aus der Theorie übernommen werden.

Optimale Anlagen bei Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung werden mit der Kombination der Optimierung der Anlagenkonfiguration durch die PDM und der Anlagensimulation erreicht. Eine der Voraussetzungen zur Steigerung der Energieeffizienz von Anlagen ist mindestens das Verständnis der Grundlagen der vorgestellten Methoden.

Für eine Vertiefung der Materie sei auf die in Kapitel 4 angegebene Literatur verwiesen. Für einen fundierten Einstieg in die PDM sei der RAVEL-Kurs "La **gestion** rationelle des rejets thermiques dans l'industrie" an der EPFL unter der Leitung von Prof. D. Favrat empfohlen.

Autoren

Robert Brunner, Dr. Brunner & Partner AG, Industriestrasse **5, 5432 Neuenhof**

Daniel Favrat, Laboratoire **d'Energétique** Industrielle, Departement de Genie **Mécanique**, EPF-Lausanne, 1015 Lausanne

Hanspeter Pfenninger, Konvekta AG, Letzistrasse 23, 9015 St. Gallen-Winkeln

Nicolas Mathys, F. Hoffmann - **LaRoche** Ltd, Abt. VTEI, 5002 Basel

Raymond Morand, Helbling Ingenieurunternehmung AG, Hohlstrasse 650, SO34 Zürich

Frédéric Staine, Laboratoire **d'Energétique** Industrielle, Departement de Genie **Mécanique**, EPF-Lausanne, 1015 Lausanne

Redaktion

Robert Brunner, Dr. Brunner & Partner AG, Industriestrasse **5, 5432 Neuenhof**

Unterstützung

Abteilung Energiewirtschaft des Kantons Aargau

Trägerorganisation

Infoenergie, Beratungszentrale, **Kindergartenstr. 1**, 5200 **Windisch**

Zukunftsweisende Planungshilfen für Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung

Zusammenfassung

Im vorliegenden Bericht werden praxisnahe und zukunftsweisende Werkzeuge zur Planung von Wärmerückgewinnungs- und Abwärmenutzungsanlagen vorgestellt.

Einerseits handelt es sich um 'Konventionelle Simulation mit praxisgerechter Eingabemaske' für Anlagen vorwiegend aus der Haustechnik. Simulationsprogramme, wie beispielsweise das DOE-2, stammen ursprünglich aus der Forschung und sind deshalb für die Praxis meistens etwas umständlich zu bedienen. Die hier gezeigte vorgeschaltete Eingabemaske und Datenaufbereitung schafft Abhilfe.

Andrerseits kann durch den Einsatz der 'Pinch-Design-Methode' (PDM), die ihre Wurzeln in der Prozess- und Verfahrenstechnik hat, eine komplexe WRG/AWN-Anlage systematisch und computerunterstützt optimiert werden. Ausgangspunkt bilden die Prozessanforderungen. Mit der PDM wird dann der physikalisch notwendige minimale Energieeinsatz des Prozesses ermittelt, der als Richtschnur für Auslegung und Sanierungserfolg dienen kann.

Generell bringt ein Überdenken der Anlagen Ideen für neue Lösungsansätze. Mit der Kombination der beiden Methoden werden optimale Anlagen erhalten.

Inhaltsverzeichnis

1. Gebäude-Simulation DOE-2 für die Praxis	5
1.1 Stark reduzierter Aufwand dank neuem PC-Inputprogramm	5
1.2 Jährlicher Energiebedarf einer Lüftungstechnischen Anlage	6
1.3 Grosser Einfluss auf die Optimierung der WRG-Anlage	6
1.4 Gebäude-Simulationsprogramm DOE-2	7
1.5 Erkenntnisse / Vorteile	6
 2. Pinch-Design-Methode	 11
2.1 Prozess-Integration	11
2.2 Methoden	11
2.3 Die Pinchmethode	11
2.4 Pinch-Kurven	12
2.5 Optimale Prozess-Integration	13
2.6 Relevante Grössen	13
2.7 Beispiel Salpetersäure	14
2.6 Verbundkurven (Composite Curves)	16
2.9 Minimaler Energieverbrauch	16
2.10 Die 5 PDM-Regeln	19
2.11 Wahl für dT_{min}	19
2.12 Optimale Wärmetauschernetze	20
2.15 Verschiedene Beispiele zur Anwendung der Pinchmethode	21
2.16 Schlussfolgerung	23
 3. Energiestudie mit der Pinch-Design-Methode (PDM) bei der Eternit AG, Niederurnen	 25
3.1 Umfeld	26
3.2 Vorgehen bei der Pinch-Analyse	27
3.3 Pinch Analyse	26
3.4 Energiekonzept	26
3.5 Pinch-Design-Methode und Prozesstechnik	29
3.6 Kommentar	30
 4. Literatur	 31

Zukunftsweisende Planungshilfen für Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung

1. Gebäude-Simulation DOE-2 für die Praxis

1.1 Stark reduzierter Aufwand dank neuem PC-Input-programm

Lüftungs- und Klimaanlage verursachen Investitionskosten und benötigen Energie (Wärme und elektrische Energie). Dadurch resultieren Kapital- und Betriebskosten..

Energiesparmassnahmen erhöhen die Erstellungskosten, ergeben aber kleinere Betriebskosten und leisten einen wesentlichen Beitrag zum Umweltschutz. Im allgemeinen kann man davon ausgehen, dass Massnahmen zur sparsamen und rationellen Energienutzung nur dann durchgeführt werden, wenn sie wirtschaftlich sind.

Je nach der Interessenlage des Bauherrn kann eine Anlage aber auch nur mit möglichst geringen Investitionskosten gebaut werden.

Aufgabe des Planers ist es, transparente Entscheidungsgrundlagen zu erarbeiten und die für seinen Auftraggeber optimalste Anlage auszuwählen (siehe Kasten 1: Optimierungskriterien).

Vergleichsrechnungen nach wirtschaftlichen oder energetischen Kriterien bedingen die Kenntnis des jährlichen Energiebedarfs.

Optimierungskriterien:

Lüftungs- und Klimaanlage können prinzipiell nach einem der folgenden Kriterien optimiert werden :

■ Minimaler jährlicher Energiebedarf

(Wärme und elektrische Energie)

Bei energetischen Vergleichsrechnungen wird die elektrische Energie im allgemeinen mit einer höheren Wertigkeit als Wärme eingesetzt.

Da die Investitionskosten bei der Optimierung nach diesem Kriterium nicht berücksichtigt werden, sind solche Anlagen oft sehr teuer.

■ Minimale Jahreskosten

d.h. die Summe der jährlichen Kapital- und Betriebskosten soll minimal sein

Dabei kann die zu erwartende Teuerung von Wärme und elektrischer Energie berücksichtigt werden.

Öffentliche gauträger (Bund, Gemeinden, öffentlich-rechtliche Körperschaften, etc.) und **umweltbewusste** Bauherren können bei der Optimierung die externen Kosten der Energie mitberücksichtigen. Dies sind Kosten, welche durch den Verbrauch von Energie entstehen, aber **nicht** durch den Verursacher, sondern durch die Allgemeinheit getragen werden (beispielsweise Umweltschäden, Erwärmung der Erdatmosphäre infolge **CO₂-Ausstoss**, Smog, etc.).

Dadurch erhalten der Energieverbrauch und damit die Betriebskosten bei der Optimierung der Lüftungs- oder Klimaanlage ein höheres Gewicht.

■ Minimale Investitionskosten

Wenn Bauherr und späterer Betreiber nicht identisch sind, hat der Ersteller vielfach kein **Interesse**, zusätzliche Investitionen für Energiesparmassnahmen zu tätigen.

Trotzdem wäre es sinnvoll, wenn auch bei nur begrenzt zur Verfügung stehendem Kapital diejenige Anlage ausgewählt würde, welche den kleinsten jährlichen Energiebedarf und damit die kleinsten Betriebskosten aufweist.

Ein Generalunternehmer kann beispielsweise neben der Grundvariante mit minimalen Investitionskosten einen Mehrpreis für eine Anlage mit tieferen Gesamtkosten anbieten. Sein Kunde hat damit die Möglichkeit, einen Entschluss aufgrund einer **Wirtschaftlichkeitsberechnung** zu treffen.

Kasten 1

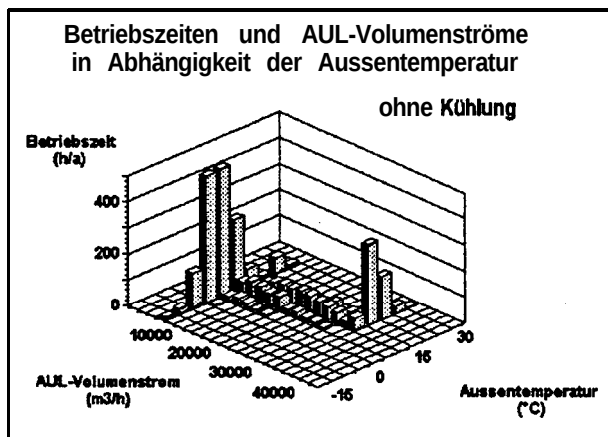


Bild 2: Minimal notwendige AUL-Volumenströme mit den entsprechenden Betriebszeiten in Abhängigkeit der Aussentemperatur) - ohne Kühlung.

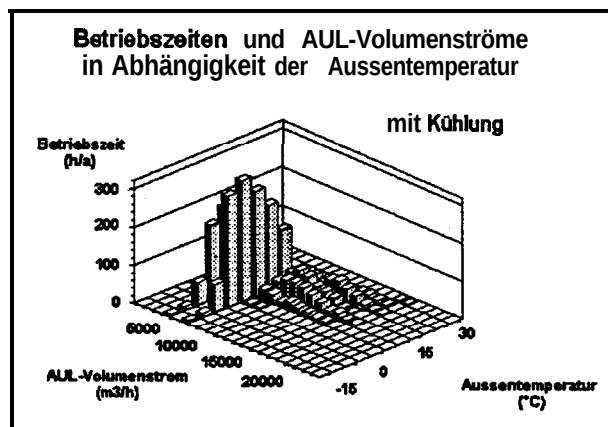


Bild 3: Minimal notwendige AUL-Volumenströme mit den entsprechenden Betriebszeiten in Abhängigkeit der Aussentemperatur) - mit Kühlung.

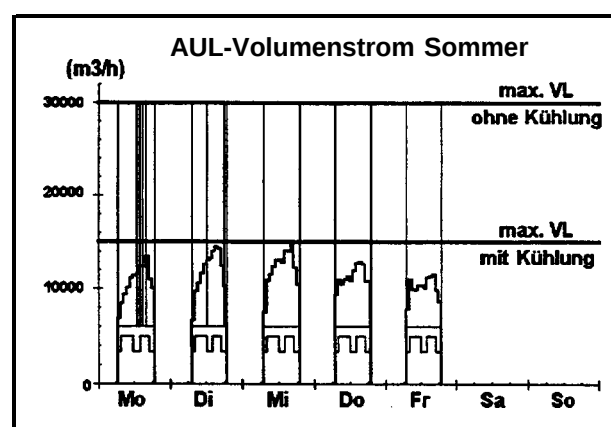


Bild 4: Zeitlicher Verlauf und Maximalwerte der Aussenluftvolumenströme mit und ohne Kühlung

1.2 Jährlicher Energiebedarf einer Lüftungstechnischen Anlage

Bei variabler Nutzung eines Gebäudes (d.h. bei im Tagesverlauf unterschiedlichen internen Wärmelasten) ist diese Berechnung aufwendig und ohne Computer kaum durchzuführen. Eine Abschätzung des jährlichen Energiebedarfs ist unter diesen Umständen jedoch ausserordentlich schwierig und kann zu sehr grossen, für Wirtschaftlichkeitsberechnungen oder energetische Optimierungen unzulässigen Fehlern führen.

Die einzige Möglichkeit, genügend genaue Resultate zu erhalten, besteht in der Verwendung eines dynamischen Gebäude-Simulationsprogramms.

Ein Gebäude-Simulationsprogramm berechnet je doch nicht nur den jährlichen Energiebedarf, sondern liefert auch alle notwendigen Grundlagen für die Optimierung einer WRG-Anlage. Beispiele für Resultate sind die Bilder 2 bis 5 und 7.

1.3 Grosser Einfluss auf die Optimierung der WRG-Anlage

Variable Betriebsbedingungen beeinflussen die Effizienz jeder Energiesparmassnahme sehr stark.

Eine wesentliche Voraussetzung für eine energetisch oder wirtschaftlich optimale Lüftungs- oder Klimaanlage ist die sorgfältige Optimierung der WRG-Anlage unter Berücksichtigung aller Einflussgrössen. WRG-Anlagen, welche auf diese Art optimiert wurden, erzielen Einsparungen des jährlichen Energiebedarfs von 69 % bis über 90 %.

Die auch heute noch vielfach übliche Auslegung einer WRG-Anlage bei den grössten Luft-Volumenströmen und bei der tiefsten Aussentemperatur ergibt einen unwirtschaftlichen Betrieb und ist daher nicht sinnvoll.

Die Kenntnis dieser Betriebszustände (Bilder 2 - 5) gestattet aber auch eine exakte Dimensionierung aller übrigen Komponenten der Klimaanlage sowie die Berücksichtigung der gegenseitigen Beeinflussung aller Massnahmen (beispielsweise erlaubt der Einbau einer WRG meistens eine Verkleinerung der Wärme-Erzeugung inkl. Verteilung sowie der Kälteanlage inkl. Rückkühlung) (Bild 6).

1.4 Gebäude-Simulationsprogramm DOE-2

Die Vorteile dieser Berechnungen sind schon lange bekannt. Leider war die Anwendung bisher so kompliziert, aufwendig und daher teuer, dass Gebäude-Simulationsprogramme meistens nur bei grösseren Klimaanlagen mit Kühlung eingesetzt wurden (z.B. für Bedarfsnachweis).

Aus diesen Gründen wurde versucht, die Handhabung eines Gebäude-Simulationsprogramms zu vereinfachen und damit die Voraussetzung für dessen vermehrten Einsatz zu schaffen (Bild 8).

Bedingung war eine wesentliche Reduktion des Aufwandes für den Input sowie eine übersichtliche Darstellung der Resultate.

Diese Ziele wurden durch folgende Massnahmen erzielt:

Die Eingabe wurde durch die Verwendung eines neuen PC-Inputprogramms stark vereinfacht und auf die Problemstellung des HLK-Planers beschränkt. Etliche Spezialfälle lassen sich unter Umständen damit nicht berechnen, beispielsweise eine eigentliche Gebäude-Optimierung (Bilder 9, 10).

In der Vorprojekt-Phase kann eine Groboptimierung mit Hilfe einer Standard-Nutzung des entsprechenden Raumes (Büro, Restaurant, Küche, Saal, etc.) durchgeführt werden. Damit stehen bereits umfangreiche Informationen in genügender Genauigkeit zur Verfügung (Bilder 5, 7).

Diese Standard-Nutzungen werden in einer im Frühjahr 1998 erscheinenden, neuen SWKI-Richtlinie "Berechnung des jährlichen Energiebedarfs einer Lüftungstechnischen Anlage" definiert.

Wenn während der Projekt- oder Ausführungsphase die genauere Nutzung bekannt ist, werden die Standardwerte durch anlagebezogene Daten ersetzt. Damit ist in einem zweiten Durchgang eine Feinoptimierung der gesamten Lüftungs- oder Klimaanlage möglich.

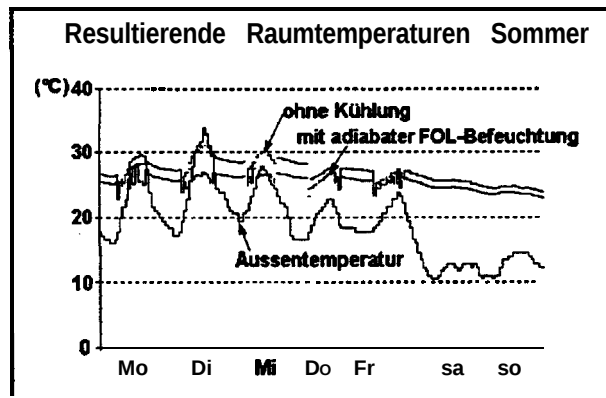


Bild 5: Zeitlicher Verlauf der Raumtemperaturen im Sommer mit und ohne Kühlung.

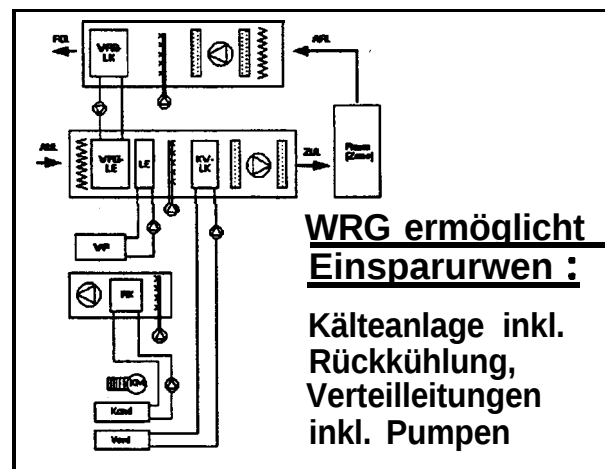


Bild 6: Klimaanlage mit WRG und Kältemaschine

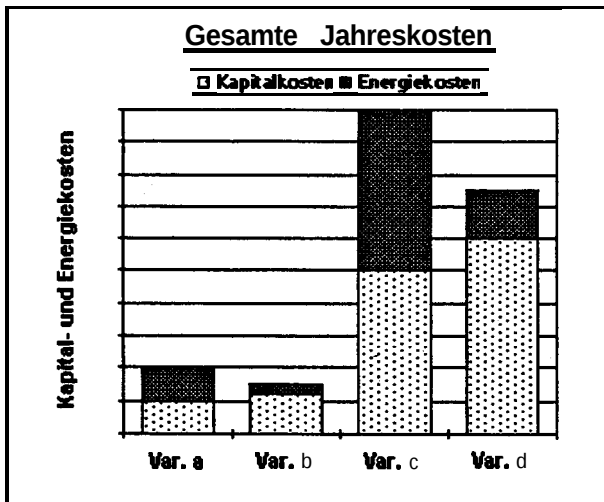


Bild 7: Lüftungstechnische Anlage mit und ohne Kühlung für ein Bürogebäude mit mittleren internen Wärmelasten. Optimierung nach wirtschaftlichen Kriterien:

Ist der Einbau einer **WRG-Anlage** wirtschaftlich?

- Lüftungsanlage ohne WRG
- Lüftungsanlage mit optimaler WRG (minimalste Gesamtkosten)
- Klimaanlage mit Kühlung ohne WRG
- Klimaanlage mit Kühlung mit optimaler WRG (minimalste Gesamtkosten)

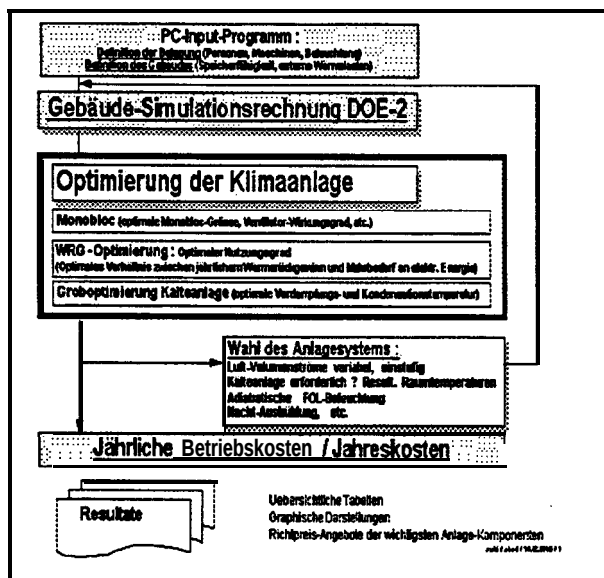


Bild 8: Gebäudesimulationsprogramm als Grundlage der Anlagenoptimierung

Im allgemeinen kann der HLK-Planer mit Hilfe eines gut verständlichen PC-Programms alle notwendigen Input-Daten mit einem relativ kurzen Zeitaufwand selbst definieren :

- Nutzung des Raumes in Abhängigkeit der Tageszeit und des Wochentags, d.h. Personen, Beleuchtung und Maschinen (PC, Drucker, Kopierer, etc.).
- Oft werden diese Daten auch für eine konventionelle Planung einer Lüftungs- oder Klimaanlage ebenfalls benötigt und müssen für eine Gebäude-Simulation nicht extra erarbeitet werden.
- Geometrie und Gebäude-Konstruktion (schwere, mittelschwere oder leichte Bauart Speicherfähigkeit), Fenster mit / ohne Sonnenschutz-Einrichtungen.

Als Output stehen viele übersichtliche graphische Darstellungen und Tabellen für eine einfache und schnelle Entscheidungsfindung sowie als Grundlage für die weitere Planung zur Verfügung.

In der schweizerischen Haustechnik-Branche wird mehrheitlich das anerkannte und seit langem bewährte amerikanische Gebäude-Simulationsprogramm DOE-2 eingesetzt.

1.5 Erkenntnisse / Vorteile

- Der Aufwand für die Optimierung einer Lüftungs- oder Klimaanlage mit Hilfe eines Gebäude-Simulationsprogramms ist dank der getroffenen, zulässigen Vereinfachungen nur unwesentlich höher als bei der bisherigen, konventionellen Planung.
- Dank der Verwendung eines Gebäude-Simulationsprogramms erhält man eine wesentlich bessere **Kenntnis** der Betriebsbedingungen und somit des jährlichen **Energiebedarfs**. Dadurch sind System-Entscheidungen aufgrund wirtschaftlicher Überlegungen möglich, beispielsweise :
Soll die Anlage einstufig, zweistufig oder mit variablen Luft-Volumenströmen betrieben werden ?

Durch die Berechnung der minimal notwendigen Luft-Volumenströme (statt Abschätzung des Luftwechsels nach Erfahrungswerten) können die Sicherheitsreserven reduziert und damit die Lüftungs- oder Klimaanlage kleiner und daher kostengünstiger dimensioniert werden. Einzelne Komponenten erzielen gleichzeitig einen höheren Wirkungsgrad bei den am häufigsten vorkommenden Betriebszuständen.

- Ausserdem werden die gegenseitigen Beeinflussungen der einzelnen Anlagenteile **berücksichtigt**: Eine optimierte WRGANlage erlaubt beispielsweise die Verkleinerung der Wärme-Erzeugung inkl. Verteilung sowie der Kälteanlage inkl. Rückkühlung. Die daraus resultierenden Einsparungen können grösser sein als die gesamten Investitionskosten der WRG-Anlage.
- Vor allem für die **WRG-Optimierung** sind die mit der Simulationsrechnung gewonnenen Daten wichtig. Als Ergebnis dieser Berechnungen resultieren der optimale **Nutzungsgrad** der WRG-Anlage und damit die optimale Grösse der WRG-Austauscher. Dank der Verwendung eines Gebäude Simulationsprogramms kann mit einer kleineren und daher günstigeren WRG-Anlage der gleiche jährliche Netto-Energierückgewinn erzielt werden wie mit grösseren, nicht optimierten WRG-Austauschern. Damit verringern sich gleichzeitig sowohl Kapital- wie auch Betriebskosten, bezüglich Wirtschaftlichkeit sicherlich ein sehr grosser Vorteil.

- Auch unter dem Gesichtspunkt der grauen Energie ist es sinnvoll, bei der Planung mehr Aufwand zu treiben und dafür Material einsparen zu können.
- Klimaanlage mit Kühlung sollten auf jeden Fall nur noch mit Hilfe eines Gebäude-Simulationsprogramms projektiert werden. Vor allem die richtige Dimensionierung der Kälteanlage ermöglicht grosse Einsparungen an Investitions- und Betriebskosten.

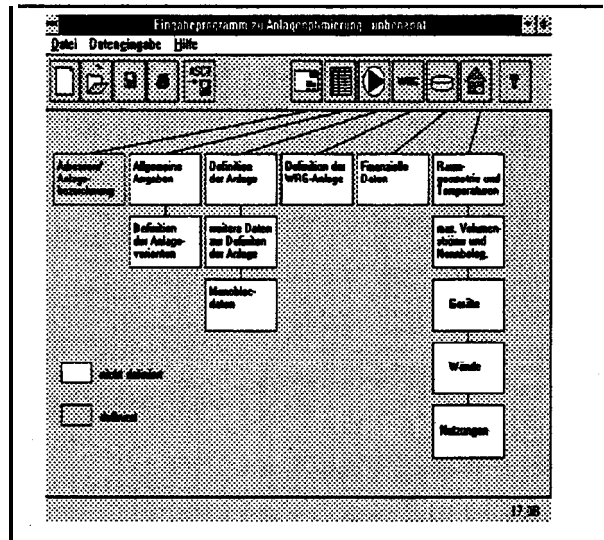


Bild 9: Übersicht und Abarbeitungskontrolle; **vollständig** definierte Eingaben werden durch einen Farbwechsel angezeigt.

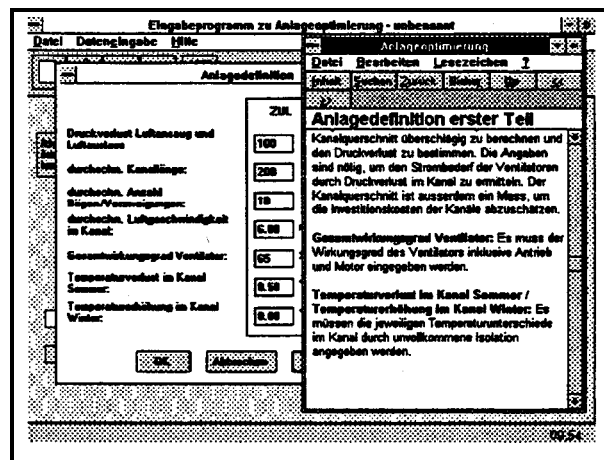


Bild 10: Vorgabewerte und Hilfemenu führen auch den wenig geübten Benutzer zum Ziel.

Schlussfolgerung :

Bei der Beurteilung von lüftungstechnischen Anlagen sollten daher als Entscheidungsgrundlage die gesamten Jahreskosten (Kapital- und jährliche Betriebskosten) verwendet werden. Damit erhält der Bauherr die Möglichkeit, verschiedene Angebote mit unterschiedlichen Investitionskosten aufgrund wirtschaftlicher Überlegungen zu vergleichen.



2. Pinch-Design-Methode

2.1 Prozess-Integration

Prozess-Integration ist der gebräuchliche Sammelbegriff für systemorientierte und integrale Ansätze, um industrielle Prozesse und Anlagen hinsichtlich Investitions- und Betriebskosten, Energieverbrauch, Flexibilität und Emissionen zu optimieren.

2.2 Methoden

Es wird dabei eine ganzheitliche Sicht eines technischen Systems unter Einbezug der Einschränkungen durch Betrieb und Verfügbarkeit praktiziert.

Systemtechnische Ansätze einerseits, wie zum Beispiel die Exergiebetrachtungen, scheitern häufig bei der Umsetzung in die Praxis wegen fehlender thermodynamischer Kenntnissen und/oder der wirtschaftlichen Auswirkung im jeweiligen Fall. Computerprogramme andererseits, mit denen 'alles' berechnet werden kann, liefern oft eine unüberschaubare Menge von Daten und Lösungsmöglichkeiten. Häufig fallen bei Simulationsrechnungen, wenn eine eigentliche Benutzerführung fehlt, hohe Kosten an.

2.3 Die Pinchmethode

Die Pinch Design Methode (PDM) ist das wichtigste und bisher am weitest entwickelte Instrument der Prozess-Integration. Sie ist nicht nur in Industrieanlagen, sondern bei allen wärmetechnischen Systemen einsetzbar, die eine gewisse Komplexität aufweisen. Sie ermöglicht, ausgehend von den **Prozessanforderungen**, die Berechnung des physikalisch notwendigen minimalen Energieeinsatzes der Prozesse. Sie erlaubt, bei bestehenden Anlagen den Optimierungsgrad festzustellen, Energiesparpotentiale aufzuzeigen und dient als Hilfsmittel zur Auslegung der vorgeschlagenen Änderungsmaßnahmen.

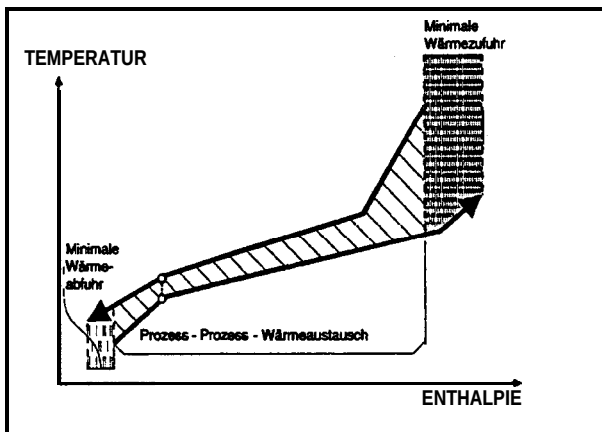


Bild 12: Darstellung und Bedeutung der Verbundkurven

Methoden für die optimierte Implementierung von Wärmepumpen und Wärmekraftkopplungsanlagen sowie zur Optimierung hinsichtlich Schadstoffemission und Betriebskosten vervollständigen die Anwendungsmöglichkeiten.

Entwickelt wurde die Pinch-Technologie Anfang der 80er Jahre von Prof. Bodo Linnhoff an der Universität Manchester in England. Sie wurde zuerst in chemischen und petrochemischen Prozessen angewandt. Ende der 80er Jahre wurde ihr Einsatzgebiet auf weitere energetisch bedeutende Bereiche der Industrie (Lebensmittel, Zement, Kraftwerke etc.) ausgeweitet.

Die PDM zielt auf die Vereinfachung des ersten und zweiten thermodynamischen Prinzips ab. Zunächst wird eine Bestandsaufnahme aller (zu kühlenden) Abwärmeströme und aller zu erwärmenden Energieströme durchgeführt. Mit dem Ziel einer optimalen thermischen Nutzung der warmen Ströme erfolgt dann eine Synthese der «warmen» und «kalten» Wärmeströme.

Die Wärmeströme werden prozessspezifischen Temperaturintervallen zugeordnet. Die resultierenden Verbundkurven (Composite Curves) erlauben dann eine Abschätzung der Wärmetauscher. Die Pinch Technologie, die Informationen über Energiepotentiale innerhalb eines Prozesses strukturiert zusammenfasst, zielt auf eine energetisch und wirtschaftlich optimale Wärmeübertragung mit Wärmetauschern; es können damit aber auch komplexere Technologien wie Wärmepumpen und Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen beurteilt werden.

2.4 Pinch-Kurven

Im allgemeinen Fall zeigen die beiden Verbundkurven eine typische Einschnürung (englisch "pinch" = Einschnürung), die der Methode den Namen gibt (Siehe die typischen Kurven in Bild 12). Die Darstellung des optimalen (oder globalen) Pinch in einfachen Temperatur-Enthalpiestrom-Diagrammen ermöglicht eine umfassende Globaldiagnose der Anlage oder des Systems und erlaubt die Abschätzung eines realistischen Zielwerts des Energieverbrauchs. Durch die einfache Verknüpfung von Physik und Wirtschaftlichkeit in den auf dieser Methode beruhenden Programmen resultieren sowohl für neue als auch bestehende Anlagen optimale Lösungsansätze. Die Methode ist universell einsetzbar. Sie liefert als Ergebnis ein optimales

Wärmetauscher-Netzwerk mit realistischen Temperaturdifferenzen. Bei der Optimierung von Anlagen mit der PDM findet man direkt die optimale Lösung.

2.5 Optimale Prozess-Integration

Die Pinch Design Methode erlaubt eine optimale Einbindung von Wärmepumpen oder Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen in wärmetechnischen Anlagen. Zahlreiche Analysen von Anlagen haben ergeben, dass die mit der PDM erreichten Lösungen zu kleinerem Energieverbrauch und bei Neuanlagen oft auch zu tieferen Investitionskosten führen. Damit lässt sich auf einleuchtende Weise zeigen, dass Lösungen zum Energiesparen in einer neuen Anlage nichtnotwendigerweise mit höheren Investitionen verbunden sein müssen.

Tatsächlich erlauben uns die Methoden der Thermodynamik, die Rückgewinnung von Energie zu optimieren, und dabei die Gesamtkosten für extern gelieferte Energie zu senken.

2.6 Relevante Größen

In der Industrie wird der Ingenieur oft mit sehr komplexen Energieflussdiagrammen und Schemata von Anlagen konfrontiert. Mühsam und aufwendig muss er sich zuerst einen groben Überblick verschaffen. Sein Ziel ist in erster Linie die Bestimmung des realen Einsparungspotentials, und darauf aufbauend, die Sanierung oder Überarbeitung der Anlage. Daher müssen am Anfang alle für das Hauptziel unwichtigen Elemente aus dem Diagramm entfernt werden. Dazu zählen unter anderen: Wärmetauscher der Energieversorger (Heizung, Kühlung), Wärmetauscher zur Wärmerückgewinnung, Wärme-Kraft-Kopplung, etc., die mit dem untersuchten Prozess direkt nichts zu tun haben.

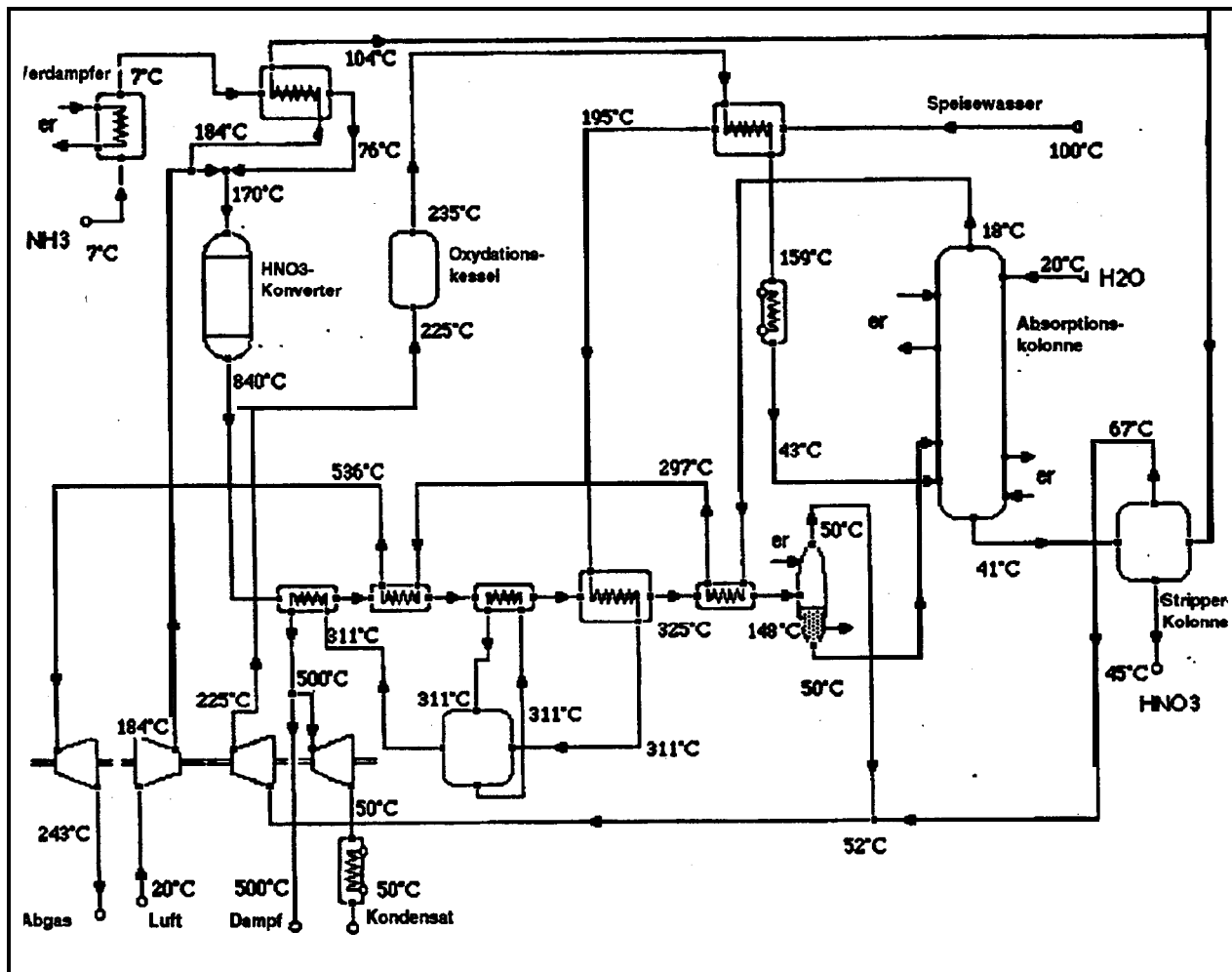


Bild 13: Gesamtschema einer Salpetersäureanlage

2.7 Beispiel Salpetersäure

In unserem Fall wollen wir von einer bestehenden Anlage ausgehen. Als Beispiel dient uns eine Anlage zur Herstellung von Salpetersäure gemäss Bild 13 [2.4]. Trotz den bereits durchgeführten Vereinfachungen im Diagramm ist noch keine sofortige, ganzheitliche Sicht möglich. Bei der Analyse eines Diagramms empfiehlt es sich, die Hauptströme direkt vom Systemeintritt bis zu den prozessbestimmenden Komponenten (Konverter, Absorber, Reaktor) zu verfolgen. Die thermodynamischen Zustände beim Eintritt in das System und beim Eintritt in die Komponente bilden dabei Anfangs- und Endpunkt des Energievektors. Die gleiche Operation kann für alle Produkte zwischen dem Austritt der einen Komponente und dem Eintritt einer anderen

Komponente durchgeführt werden. Bei diesem Vorgehen werden die von den Prozessspezialisten gemachten Vorgaben (Ein- und Austrittsbedingungen) nicht verändert.

Bild 14 zeigt das Syntheschema, das aus der ersten Untersuchung der in Bild 13 gezeigten Anlage hervorgeht. Nach Vereinbarung werden die zu erwärmenden Ströme, die den Energiebedarf repräsentieren, kalte Ströme genannt. Diejenigen Ströme, die gekühlt werden können und Möglichkeiten zur Energierückgewinnung darstellen, werden als warme Ströme bezeichnet.

In diesem Stadium ist es unser Ziel, erst ein Netzwerk aus Wärmetauschern zu schaffen und dann mit Energieerzeugern zu ergänzen, was es erlaubt, bei voller Funktion den Grundanforderungen gerecht zu werden und gleichzeitig die Betriebskosten inklusiv Abschreibungen zu minimieren. Diese Kosten setzen sich aus Energiekosten für extern gelieferte Heizenergie und Kühlung, für das Heiz- oder Kühlmedium (Kühlwassermenge, etc.), den Investitionskosten für die Wärmetauscher sowie für die Infrastruktur (Heizkessel und Kühlaggregate).

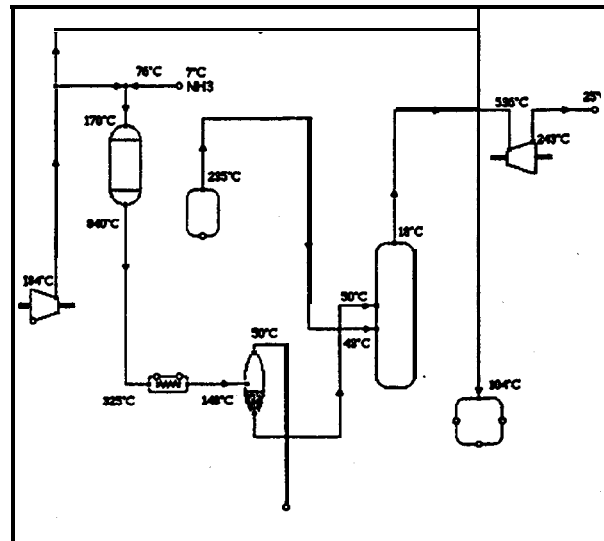


Bild 14: Vereinfachtes Schema mit den wichtigsten Größen

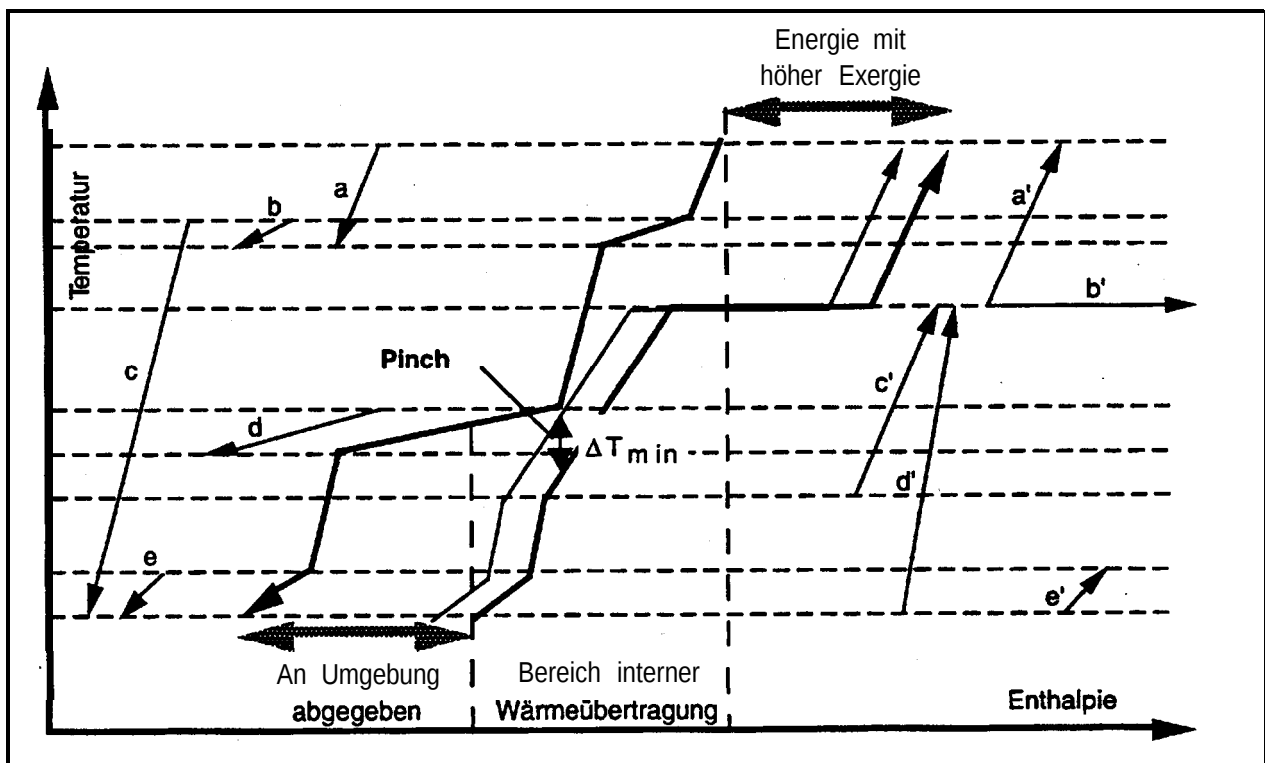


Bild 15: Wärmestromvektoren und Verbundkurven in einem Temperatur-Enthalpie-Diagramm

Minimaler Verbrauch und Verluste:

■ Die Enthalpiedifferenz zwischen warmem und kaltem Strom bei der niedrigsten Temperatur, am unteren Ende der Kurven, trägt ein positives Vorzeichen. Sie repräsentiert die minimale Energiemenge, die das System an eine externes «Kältereservoir» abgeben muss.

■ Analog ist die Enthalpiedifferenz am oberen Ende der Verbundkurven die minimale Energiemenge, die dem System von einer externen Wärmequelle geliefert werden muss.

■ Je weiter man die Verbundkurven voneinander entfernt (wachsendes $\Delta T_{\min}$), desto mehr reduziert sich die Zone der internen Wärmeübertragung, und desto mehr erhöht sich der minimale Energieverbrauch des Systems.

2.8 Verbundkurven (Composite Curves)

Zur Ermittlung des optimalen Pinch (bezüglich der Theorie siehe [2.1, 2.5 - 2.81]) müssen alle Vektoren der warmen Ströme a, b, c, d, e und alle der kalten Ströme a', b', c', d', e' in einem **Temperatur-Enthalpie-Diagramm** (Bild 15) eingezeichnet werden. In einem solchen Diagramm ist nur die **Ordinate absolut** (Temperatur = Funktion des Zustandes), während die Enthalpie (als Wärme kapazitätsstrom dargestellt) auf der Abszisse als Enthalpieänderung ohne absoluten Massstab eingetragen wird. Die **Vektoren** können daher **horizontal frei** verschoben werden.

Mit dem Ziel einer ganzheitlichen Sicht repräsentieren die **warmen Ströme** alle Möglichkeiten zur **Wärmerückgewinnung** und werden zu einer als «warm» bezeichneten Composite **Curve** (Verbundkurve) zusammengesetzt. Die kalten Ströme, die den **Verbrauch** repräsentieren, werden zu einer ähnlichen, «kalt» genannten Composite **Curve** (Verbundkurve) kombiniert.

Kasten 16

Wie oben erwähnt, kann jede Verbundkurve innerhalb ihres Temperaturniveaus horizontal frei verschoben werden. Das Ziel ist, die Möglichkeiten zur Wärmeübertragung zwischen den Strömen sichtbar zu machen; es ist darauf zu achten, dass die warme immer über der kalten Verbundkurve liegt.

Pinchtemperatur und minimale Temperaturdifferenz dT_{min} : An der Grenze berühren sich die Kurven in einem charakteristischen Punkt, dessen Temperatur Pinchtemperatur genannt wird, und welche eine wichtige Rolle spielt.

Wird davon ausgegangen, dass Wärmeenergie immer vertikal von der warmen zur kalten Verbundkurve, wie in einer Art grossem Gegenstromwärmetauscher übertragen wird, so zeigt die Pinchtemperatur die kleinste Temperaturdifferenz an, bei der die gewünschte Wärmeübertragung möglich ist. Bei einem Pinch gleich Null braucht man Wärmetauscher mit unendlich grosser Oberfläche. Das kälteste Ende der kalten Verbundkurve und das wärmste Ende der warmen Verbundkurve begrenzen den Bereich, in dem interne Wärmeübertragung theoretisch möglich ist. Dieser Bereich ist maximal, wenn sich die beiden Kurven berühren. Wenn man sich von diesem unrealistischen Extremfall entfernt, verschiebt man die Kurven horizontal, bis man eine wirtschaftlich sinnvolle minimale (Pinch) Temperaturdifferenz erreicht.

Der Pinch-Point hat die bemerkenswerte Eigenschaft, das untersuchte System in zwei Untersysteme zu teilen (Siehe Bild 17):

- Das Untersystem rechts vom Pinch weist ein **Energiemanko** auf und stellt somit eine **Wärmesenke** dar.
- Das Untersystem links vom Pinch hat einen **Energieüberschuss**, aber mit niedriger Exergie, und kann als Wärmequelle dienen.

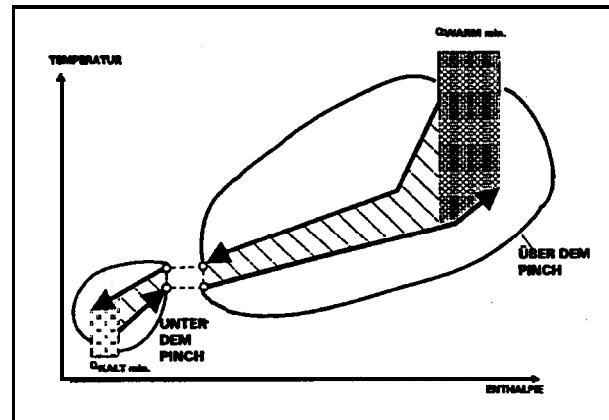


Bild 17: Trennung des Systems durch den Pinch-Point (Pinch-Punkt).

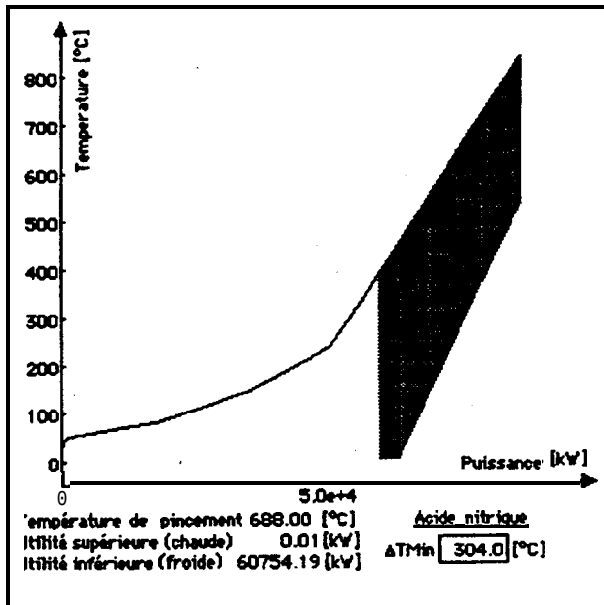


Bild 18 Verbundkurven der Salpetersäureproduktion

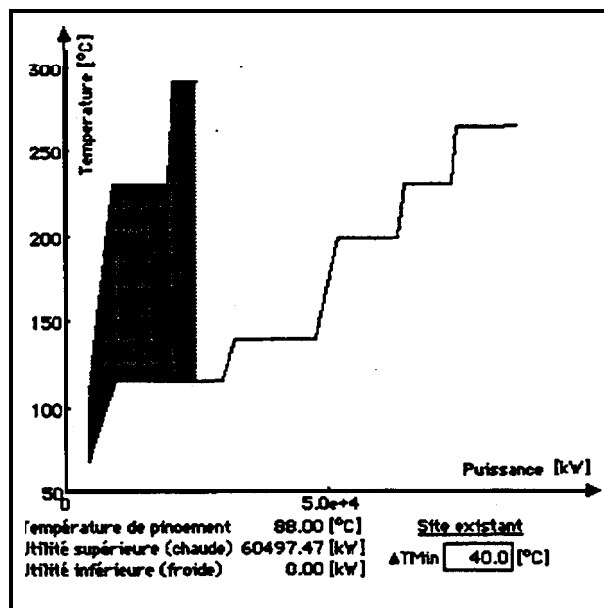


Bild 19: Verbundkurven der existierenden Anlage

2.9 Minimaler Energieverbrauch

Ein grosser Vorteil des Pinch sticht damit schon hervor: Die degante Bestimmung des Minimalverbrauchs selbst bei komplexen Anlagen. Die Abweichung zwischen dem tatsächlichen Verbrauch der bestehenden Anlage und dem theoretischen Minimalverbrauch lässt eine gute Beurteilung des Optimierungsgrads und der zu treffenden Massnahmen zu. Bei einer grosse Differenz sind weitere Untersuchungen angezeigt und ist eine hohe Wirtschaftlichkeit der Massnahmen zu erwarten.

Die Bilder 18 bis 20 illustrieren die Möglichkeiten eines Systemüberblicks mit Verbundkurven am Beispiel eines Prozesses zur Salpetersäureproduktion, einer Industrieanlage, in der dieser eingesetzt werden soll, und der Anlage mit implementiertem Prozess. Das Potential einer energetischen Integration ist deutlich zu sehen.

2.10 Die 5 PDM-Regeln

Wie wir gesehen haben, trennt der Pinch das System in zwei Untersysteme. Das Untersystem zur Rechten (Senke) erfordert prinzipiell Wärmezufuhr, das Untersystem zur Linken **muss** prinzipiell gekühlt (Wärmeabfuhr) werden. Die beiden Untersysteme können als thermodynamisch getrennt betrachtet werden. Es gelten die 5 Regeln **gemäss** Kasten 21 für ein optimales System.

2.11 Wahl für dT_{min}

Der optimale Pinch dT_{min} wird normalerweise von klassischen wirtschaftlichen Kriterien bestimmt (Bild 22), man kann jedoch auch globale energetischen Kriterien nutzen, wie zum Beispiel graue Exergie **und/oder** Umweltfaktoren. Sowohl die Bestimmung der Verbundkurven und des Pinch als auch die Entwicklung der Netzwerke können durch die Nutzung zusätzlicher Methoden [2.1,2.5] und computer-unterstützter Programme erleichtert werden [2.6].

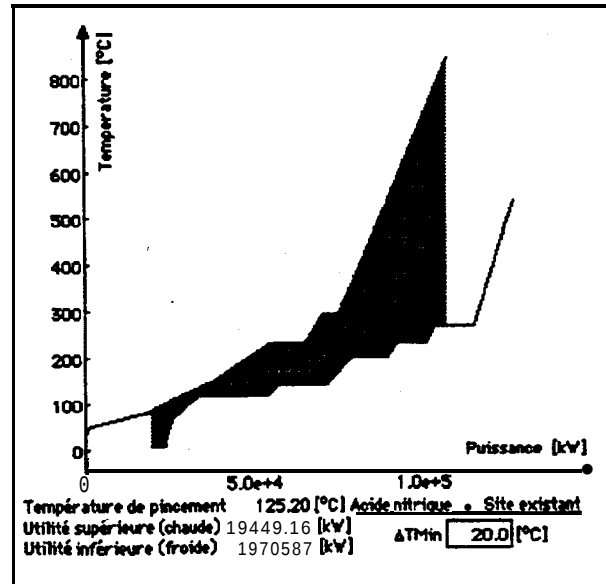


Bild 20: Verbundkurven der existierenden Anlage und der Salpetersäure-Produktion

- 1 Keine Wärme über den Pinch übertragen
- 2 Keine externe Kühlung über dem Pinch
- 3 Keine externe Heizung unter dem Pinch
- 4 Keine Wärme-Kraft-Kopplung, die einen Grossteil der Abwärme unter dem Pinch liefert
- 5 Keine Wärmepumpen, ausser wenn sie über den Pinch arbeiten.

Kästen 21

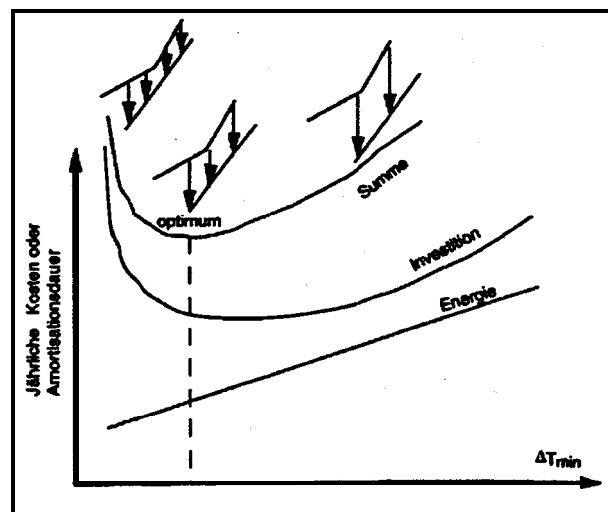


Bild 22: Entwicklung der verschiedenen Kosten in Abhängigkeit von dT_{min} .

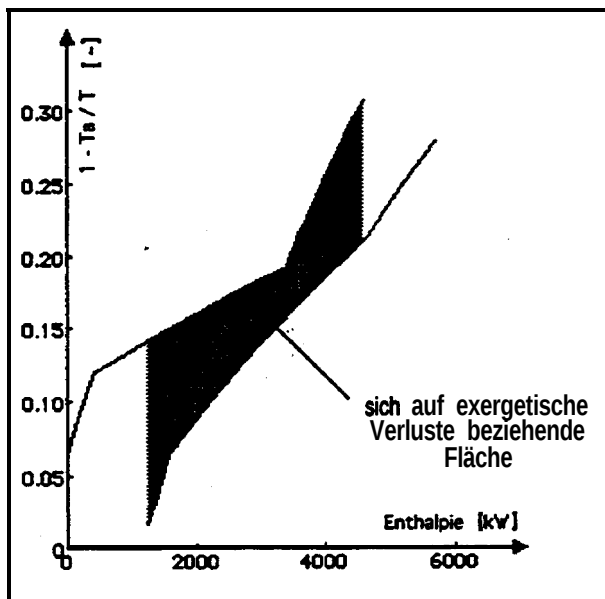


Bild 23: Exergetische Verluste der internen Wärmeübertragung.

Nach Euler gilt für die Anzahl Wärmetauscher:

$$u = N + L - s$$

u = Anzahl Wärmetauscher
 N = Anzahl der Ströme
 L = Anzahl der Schlaufen
 s = Anzahl Untersysteme

Kasten 24

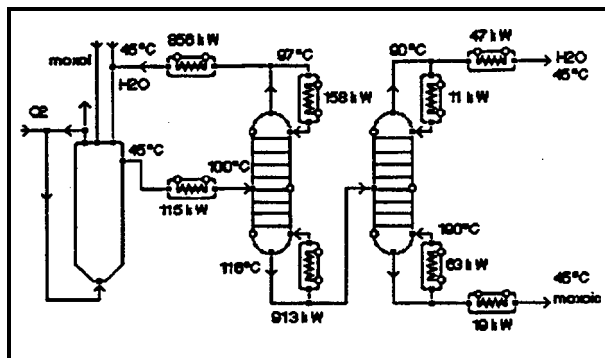


Bild 25: Vereinfachtes Schema der Produktion von Methoxyessigsäure.

Durch eine etwas geänderte Darstellung der Verbundkurven in einem Diagramm ($1 - T_a/T, dH_p$) stellt die Fläche unter den Kurven die Koenthalpie (Wärmeexergie) und die Fläche zwischen den Kurven in der Uebertragungszone die exergetische Verluste des internen Wärmeaustauschs (Bild 23) dar.

2.12 Optimale Wärmetauscher-netze

Der Entwurf eines optimalen Wärmetauschernetzes beginnt beim Pinch. Der Pinch unterteilt das System in zwei Untersysteme. Bewährt zur Aufstellung des optimalen Netzes hat sich eine einfache Darstellung der Wärmeflüsse mit Pfeilen. Die Anzahl Wärmetauscher ergibt sich nach Kasten 24. Für weitere Vertiefungen in diese Thematik sei auf Literatur [2.5, Seite 80 ff] verwiesen.

2.15 Verschiedene Beispiele zur Anwendung der Pinch-methode

Herstellung von Methoxyessigsäure

Beschreibung: Die Herstellung von Methoxyessigsäure erfolgt nach einem Patent von Hoechst durch Cxiation. Methoxyäthand reagiert mit Sauerstoff und einer grossen Wassermenge. Nach Verlassen des Reaktors durchläuft das Produkt zur Trennung von Wasser und Säure zwei aufeinander folgende Destillationskolonnen (Destillation und dann Rektifikation) (Bild 25). Die in Tabelle 26 definierten Rahmenbedingungen des ursprünglichen Prozesses führen zu den Verbundkurven in Bild 27 und 28 [2.11].

Lösungsvorschlag: Mechanische Brüdenverdichtung

Die Dampftemperatur in der Spitze der Destillationskolonne (grosse Stufe in der warmen Composite Curve) ist zur Beheizung des Verdampfers am Kolonnenfuss (Stufe in der kalten Composite Curve) zu niedrig. Eine Erhöhung der Kondensations-temperatur durch einen Kompression des Dampfes von 0.9 auf 3 bar mit Hilfe eines mechanischen Kompressors kann die Verdampfungswärme zu Heizzwecken nutzbar machen. Die kalte Composite Curve könnte somit teilweise unter die warme geschoben und eine erhebliche Energieeinsparung erzielt werden. Anstelle von 981 kW Heizleistung aus Hochdruck-Prozessdampf werden nur noch 118 kW Hebleistung und 114 kW elektrischer Leistung benötigt.

Tin [°C]	Tout [°C]	dHp [kW]	Anmerkungen
45.01	45	280	Reaktorkühlung
45	100	115	Kolonnenheizung
99.91	99.9	156	Destillation des Kondensatrückflusses
99.91	45	856	Verdampfer Destillation
116.5	116.51	913	Kondensatdestillation
99.71	99.71	11	Rektifikation des Kondensatrückflusses
99.71	45	47	Kondensatrektifikation
190.1	190.11	63	Verdampfer Rektifikation
190.1	45	19	Säurekühlung

Tabelle 26: Rahmenbedingungen des Prozesses.

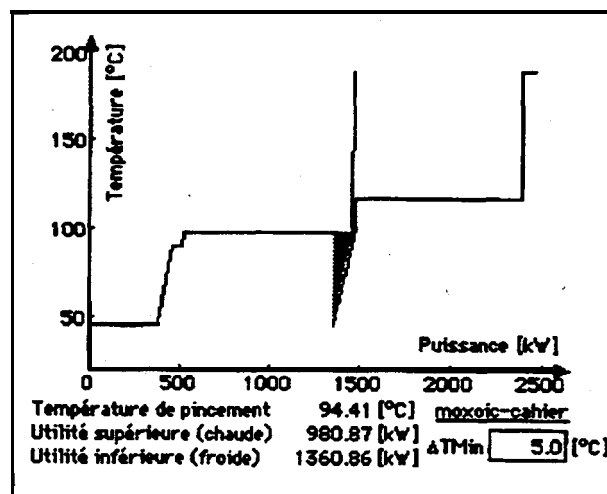


Bild 27: Ursprüngliche Verbundkurven des Prozesses Methoxyessigsäure.

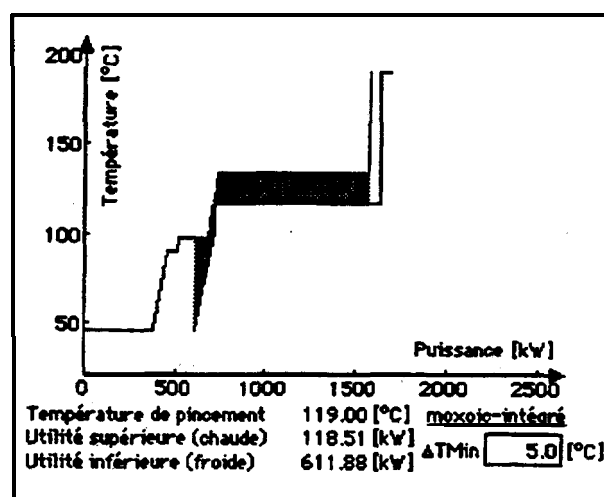


Bild 28: Verbundkurven des Prozesses Methoxyessigsäure mit integrierter Dampfkompensation.

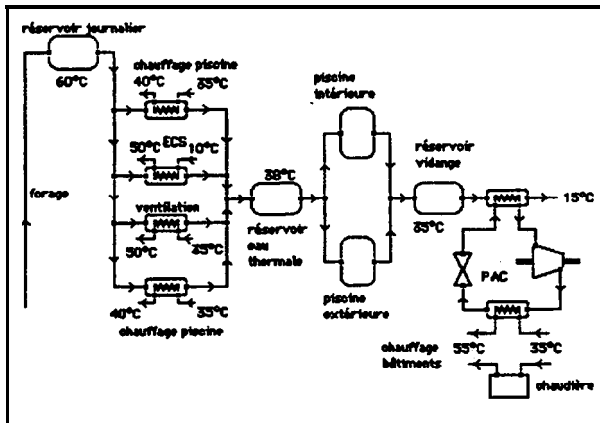


Bild 29: Vereinfachtes Schema des Heizungssystems des Thermalbades.

T _{in} [°C]	T _{out} [°C]	dHp [kW]	Anmerkungen
80	15	1230	Kühlung des heißen Quellwassers
10	50	110	Brauchwasservorbereitung
35	40	400	Schwimmbadheizung
35	55	373	Gebäudeheizung
35	50	243	Ventilation

Tabelle 30: Thermische Rahmenbedingungen für den Wärmetausch im Thermalbad.

Thermalbad

Beschreibung: Die Anlage Bild 29 wird mit einer heißen Quelle beheizt, die den grundlegenden Wärmebedarf deckt: Die Speisung der beiden Schwimmbecken mit Warmwasser und deren Beheizung, die Lüftung der Schwimmhallen, Heizung des Brauchwassers und der Gebäude mittels einer Wärmepumpe und eines Kessels. Die in Tabelle 2 definierten Rahmenbedingungen den Wärmebedarf führen zu den Verbundkurven in Bild 31 [2.12].

Lösungsvorschlag: Wärmepumpe

Der Wärmebedarf kann nicht ausschliesslich durch das heiße Quellwasser gedeckt werden, da dieses nur im Temperaturbereich oberhalb 37°C direkt zu Heizzwecken nutzbar ist. Ohne den Einsatz einer Wärmepumpe würde die im Temperaturbereich zwischen 37°C und 15°C enthaltene Energie ungenutzt bleiben.

Der Verdampfer der Wärmepumpe entzieht dem aus den Thermalbecken austretenden Wasser Energie (Verdampfungstemperatur = 12,5°C) und befördert sie auf ein höheres, nutzbares Temperaturniveau. Dieses liegt bei der Kondensationstemperatur 51,5°C, der Leistungskoeffizient der Wärmepumpe beträgt mit dem Kühlmittel R134A 5,02. Da der Bedarf an Energie höherer Temperatur bereits durch das heiße Quellwasser gedeckt wird, reicht diese aus, und die Wärmepumpe kann zusammen mit dem heißen Quellwasser den Wärmebedarf decken. Eine zusätzlicher Heizkessel ist unnötig.

2.16 Schlussfolgerung

Mit der Theorie des optimalen Pinch steht dem Ingenieur ein neues, sehr leistungsfähiges Instrument zur Verfügung. Sie hat bereits **substantielle Energieeinsparungen** in der Industrie ermöglicht und wird es noch. Vor allem für Anwendungen in zahlreichen und häufig vorkommenden **«batch»** Prozessen **muss** die Methode noch weiter entwickelt werden. Wenn auch die Theorie die Bestimmung und Platzierung der Komponenten erleichtert, so erlaubt sie nur mit grossem Aufwand, effizient und detailliert Verluste zu bestimmen, wie z.B. Druckverluste, die bei kleinem Pinch ins Gewicht fallen.

Diese Methode ist trotz der grossen Bedeutung im Energie-Engineering nur eine Ergänzung der bestehenden Verfahren und allgemeinen Methoden der Thermodynamik (z.B. Theorie der **Exergie**), sie ersetzt keine der bewährten Methoden. Einen guten Überblick über weitere Anwendungen der Pinch-Design-Methode ist in [2.13] zu finden.

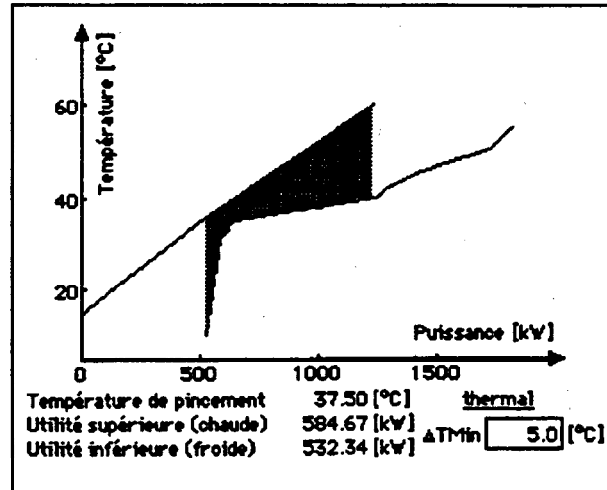


Bild 31: Den Rahmenbedingungen des Thermalbades entsprechende Verbundkurven;

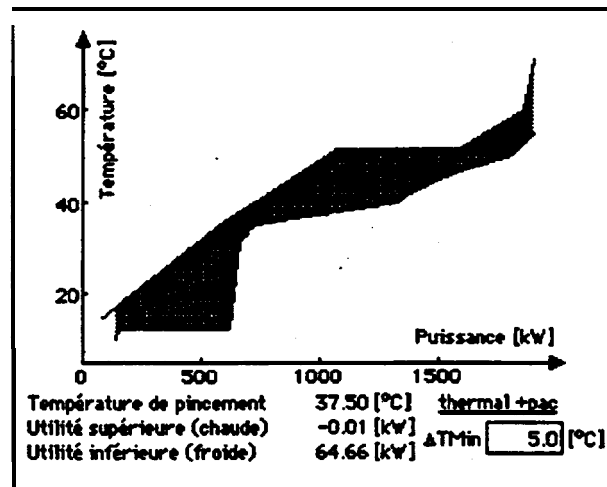


Bild 32: Verbundkurven des ausschliesslich mit einer Wärmepumpe beheizten Thermalbades.

3. Energiestudie mit der Pinch-Design-Methode (PDM) bei der Eternit AG, Niederurnen

Im Rahmen eines Pilotprojektes unter Energie 2000 wurde die Situation der Firma Eternit AG in Niederurnen im Bereich thermische Energie mittels der in der Schweiz noch wenig bekannten Pinch-Technologie untersucht. Die Anwendung dieser systematischen Analysenmethode förderte Einsparpotentiale an thermischer Energie bei den untersuchten Beschichtungsanlagen von ca. 30 % bei wirtschaftlichen Pay-back-Zeiten zu Tage. Analogien zu verwandten Problemen der Lebensmittel-, der Papier- und der Farben- und Lackierindustrie ergeben ein interessantes weiteres Betätigungsfeld für die Methode.

Im Rahmen des Programms Energie 2000 unterstützt der Bund Projekte, welche die Anwendung neuer, wenig bekannter Technologien der effizienten Energienutzung in der Industrie aufzeigen. Ziel der Unterstützung von fünf Industrie-

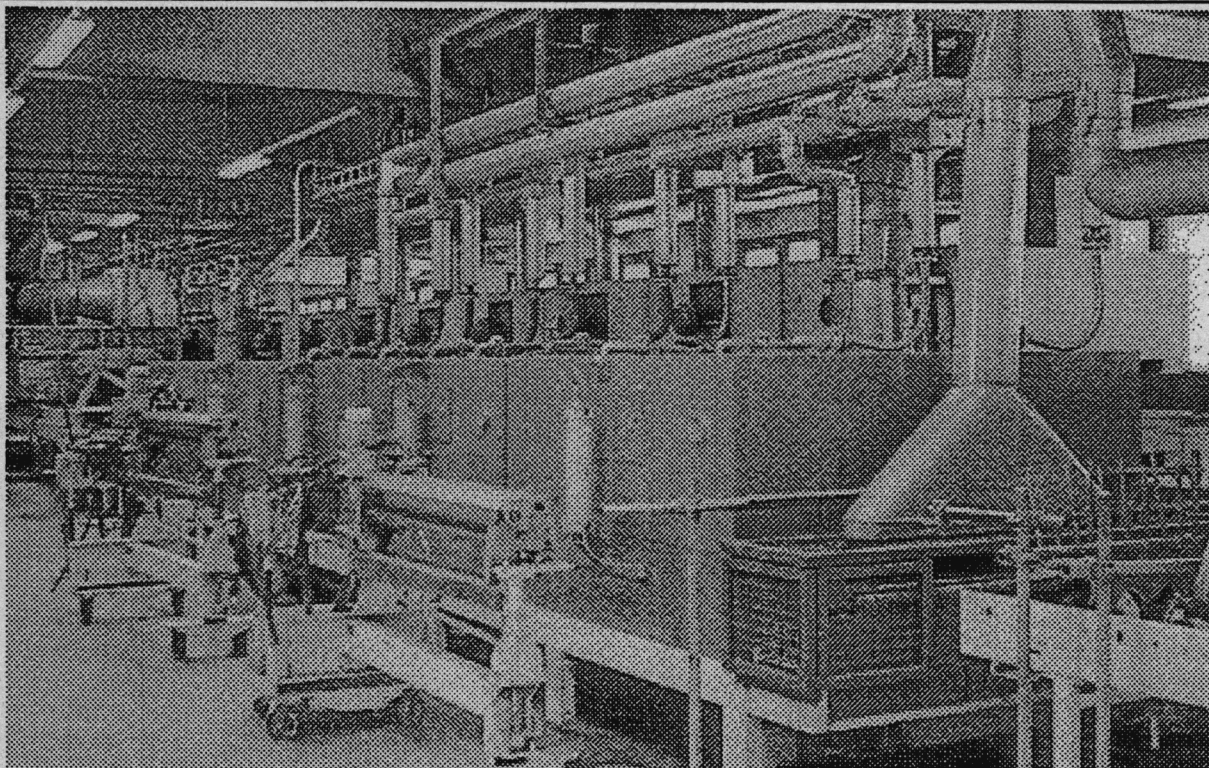


Bild 33: Eternit AG Neukonzeption der Energieversorgung mittels Pinch-Design-Analyse; Beschichtungsanlage für Faserzementplatten.

Grobanalyse auf Werksebene

Die durchgeführte Grobanalyse des Werkes Eternit AG ergab einen thermischen Energieverbrauch von 14,5 Mio. kWh, bezogen auf ein klimatisch durchschnittliches Jahr. Ca. 37% beträgt im Mittel der Anteil der **Prozessenergie**-Verbraucher, 63% der Anteil der reinen Gebäudeheizungen. Leistungsmässig verschiebt sich die Aufteilung, indem im Winter 75 % der Heizleistung für Raumheizung benötigt wird. Mit diesen Zahlen wird die Bedeutung der Raumheizung unterstrichen.

Auf **Produktionsseite** erwiesen sich die Beschichtungsanlagen und der Rohrabbinde-tunnel als Hauptenergieverbraucher.

Hauptprobleme des Werks Niederurnen sind die stark dezentrale Energieproduktion mit jeweils unterschiedlichen Temperaturniveaus der Wärmeträgermedien, die hohen **Heisswasservorlauf- und -rücklauftemperaturen**, in einem Fall bis zu 170°C bei den beiden **Hauptwärmeerzeugungsanlagen**, sowie die Vielzahl verschiedener Wärmeträgermedien wie **Heisswasser**, Heissluft, **Prozessdampf**, Wärmeträgeröl und **Wärmestrahlung**.

Kasten 34

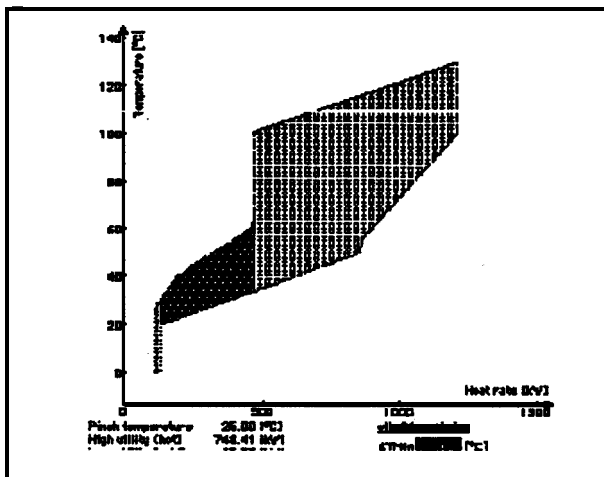


Bild 35: Verbundkurve der Beschichtungsanlage

Projekten durch das Bundesamt für Energiewirtschaft ist die Demonstration der **PinchDesign-Methode (PDM)** anhand praktischer Beispiele von Anlageprojekten. Die Eternit AG produziert Elemente aus Faserzement, insbesondere Fassaden- und Weltplatten, Formteile und Rohre, welche im Hoch- und Tiefbau Verwendung finden (Bild 33). Alle Produkte mit Ausnahme der Rohre müssen nach dem Abbindevorgang beschichtet werden.

3.1 Umfeld

Anlass für die in Auftrag gegebene Energiestudie war eine Standortbestimmung angesichts der anstehenden Sanierung der Heizenergieerzeuger zur Einhaltung der verschärften Luftreinhaltevorschriften.

In einer Grobanalyse auf Werksebene (Kasten 36: Grobanalyse) wurden die Hauptenergieverbraucher ermittelt, diese in der Detailanalyse mit der PDM untersucht und die gefundenen Sparpotentiale in konkrete Massnahmen umgesetzt. Vorschläge für ein neues wärmetechnisches Gesamtenergiekonzept mit zentralisierter Heizenergieerzeugung mit dem System der Wärmekraftkopplung schlossen die Untersuchung ab.

Ziel der Methode ist die Einsparung von Energiekosten durch Massnahmen, **welche** kurze Pay-Back Zeiten aufweisen. Die Methode wird meistens im Sanierungsfall eingesetzt, wenn **sowieso** Änderungen an den Produktionsanlagen durchgeführt werden, um so die Stillstandzeiten für den Umbau der Anlagen kurz halten zu können.

Um eine Pinch-Analyse vornehmen zu können, sind energetische Daten wie Temperaturen, Massenströme, Austauschleistungen der relevanten Energieströme (z.B. Trocknerabluft mit Wasserdampf) nötig. Daraus kann eine Modellierung der verfahrenstechnischen Einzelprozesse (z.B. Trockner) gemacht werden. Durch zusätzliche Energiebilanzen um die Einzelprozesse können die noch fehlenden energetischen Daten der Gesamtanlage ermittelt werden.

Beim Modellieren der den Einzelprozessen zu- und abgeführten Energieströme (Bsp. . Eternit: Beschichtungstrockner) wird a priori auf maximale Wärmerückgewinnung geachtet. Eingeschränkt wird diese durch gewisse, betrieblich vorgegebene

Restriktionen (z.B. Etemitplatten können nicht mit Eternitplatten ohne Zwischenkreislauf vorgewärmt werden).

Aus dem gewonnenen Modell der energetischen Daten erhält man im nächsten Schritt die Verbundkurven (Composite Curves) der Anlage. Aus Bild 36 kann die mögliche Wärmerückgewinnung (Projektion der mittleren dunklen Fläche auf die x-Achse), die extern zuzuführende Heizleistung (Projektion der helleren, vertikal schraffierten Fläche rechts der dunklen Fläche auf die x-Achse) sowie die abzuführende Kühlleistung (Projektion der vertikal schraffierten Fläche links der dunklen Fläche auf die x-Achse) abgelesen werden.

Diese drei zentralen Aussagen verglichen mit dem Ist-Zustand bilden den energetischen Optimierungsgrad der Anlage. Diese Daten hängen ab vom T_{min} , der minimalen Temperaturdifferenz zwischen den kalten und den warmen Strömen aller Wärmetauscher der Anlage. Die minimale Temperaturdifferenz ist der Parameter für die Wirtschaftlichkeit der Anlage, d. h. der jährlichen Betriebskosten inkl. Abschreibung (siehe Bild 36).

Die theoretischen Vorgaben der Verbundkurven können mit Hilfe eines Netzwerkes von Wärmetauschern in eine verbesserte Anlage mit optimaler Schaltung der Wärmetauscher umgesetzt werden. Der danach vorgenommene Vergleich Ist-Neu zeigt den Erfolg der vorgenommenen Änderungsmaßnahmen in energetischer und wirtschaftlicher Sicht.

3.2 Vorgehen bei der Pinch-Analyse

Grundsätzlich schlägt die Theorie der Pinch-Technologie ein Vorgehen nach dem Zwiebelschalenprinzip vor.

Nach dem Zwiebelschalenmodell (Bild 37) wird, ausgehend von den Prozessanforderungen, zuerst der Prozess an sich (z.B. Trockner), dann das Wärmetauschernetz optimiert. In nächster Priorität kommen Wärmespeicher zum Einsatz und erst zum Schluss werden die Heizungs- bzw. Kälteanlagen dimensioniert oder kann an den Einsatz von Wärmepumpen gedacht werden.

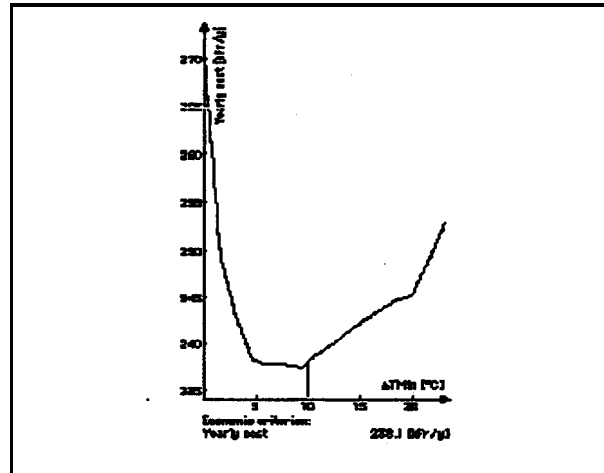


Bild 36 Verlauf der Energiekosten. Der eingezeichnete Fall gilt für $\Delta T_{min} = 10K$.

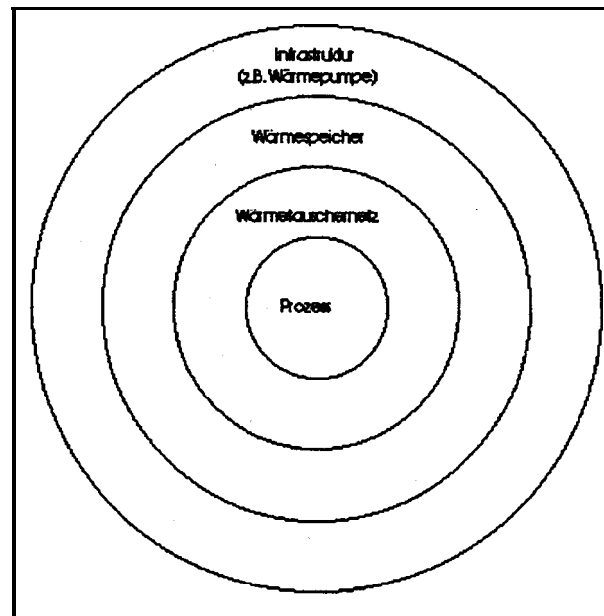


Bild 37: Zwiebelschalenmodell

	Ist-Zustand		Neu-Zustand		
Bezeichnung	leistung kW	Energie- bedarf pro Jahr MWh/a	leistung kW	Energie- bedarf pro Jahr MWh/a	Ein- parung in %
Prozessanlagen	1'483	5'318	1'038	3'777	28%
Beschichtungs- anlage	1 233	4'508	789	2'967	34%
übrige Anlagen	250	810	250	810	0%
Heizungen	4'425	9'155	3'934	7'682	16%
Rohrfabrik					
+ Gebäude 28	1 000	2'089	700	1'169	44%
Fabrikheizung	2000	4 133	2'000	4'138	0%
Glanz	670	1'386	462	762	45%
übrige Heizungen	755	1'562	772	1 613	
TOTAL	5'908	14'473	4'973	11'459	21%

Tabelle 38: Resultatübersicht

3.3 Pinch Analyse

In der Detailanalyse wurden die Hauptenergie Verbraucher unter den Produktionsanlagen untersucht. Bei der Modellierung der Energieströme wurde das Hauptaugenmerk auf die Trockner der Beschichtungsanlagen und auf die Abbindetunnels als jeweilige zentrale Verfahrenseinheiten gerichtet. Dies folgt aus der Erkenntnis heraus, dass die gewünschten Produkteigenschaften die Prozessanforderungen in diesen Verfahrenseinheiten vorgeben.

Die Pinch-Analyse zeigte realisierbare Einsparpotentiale bei den Beschichtungsanlagen für den Sommerfall von durchschnittlich 28 % bezogen auf einen heutigen Leistungsbedarf von 1,5 MW (siehe Tabelle 38). Im Winterfall kann zusätzlich gezielt Produktionsabwärme für die Grunddeckung des Heizbedarfs der Produktionshallen verwendet werden. Dabei werden ca. 16 % bezogen auf den heutigen Gesamtleistungsbedarf von 6,0 MW, in Bezug auf den Energieverbrauch sogar 21 % eingespart. Bei den Gebäuden, in welchen die Wärmerückgewinnung eingesetzt wird, beträgt die jährliche Einsparung bis zu 45 %.

Die vorgeschlagenen Massnahmen sind einerseits Prozessmodifikationen bzw. Verfahrensoptimierungen an den Trocknern selbst und andererseits die optimale Wärmerückgewinnung mittels Luft-Luft-Wärmetauschern im Sinne der Prozessintegration der ganzen Anlage. Es wird jeweils Restwärme der feuchten Abluft der Trockner entzogen und je nach Fall zur Vorwärmung der Zuluft eines benachbarten Apparates oder zur Aufheizung von Hallenluft verwendet.

Die vorgeschlagenen Massnahmen ergeben jährliche Betriebskosteneinsparungen von ca. Fr. 120'000.- im Vergleich zu nötigen Investitionen von ca. Fr. 480'000.-. Daraus ergibt sich eine durchschnittliche Pay-Back-Zeit von 4.5 Jahren, der im Einzelfall zwischen 3 und 12 Jahren schwankt.

3.4 Energiekonzept

Das wärmetechnische Gesamtenergiekonzept baut auf den Einsparungen bei den Produktionsanlagen und der Wärmerückgewinnung in der Rohrfabrik auf. Zusätzlich müssen die beiden Trockner der grössten Beschichtungsanlage umgebaut und die restlichen Trockner angepasst werden. Dabei kann dank des

Einsatzes der Pinch-Technologie eine Vereinheitlichung der Temperaturniveaus der Vor- und Rücklauftemperaturen des Energieversorgungssystems erreicht und diese den Erfordernissen eines Blockheizkraftwerks angepasst werden.

Da die bisherigen Heizungsanlagen den neuen LRV-Vorschriften nicht entsprechen und gleichzeitig ein hohes Alter aufweisen, so dass ein Totersatz der Anlagen sich aufdrängt, wird als neue Heizzentrale ein Blockheizkraftwerk mit 2 Modulen und 2 Spitzenkesseln vorgeschlagen.

Vorteile dieser Anordnung liegen in der guten Wirtschaftlichkeit (Wärmepreis: 4.9 Rp/kWh) und in der Möglichkeit, einen Teil der Stromspitzen durch Eigenproduktion zu brechen. Die vorgeschlagene Anordnung gewährleistet eine sehr effiziente Nutzung von fossiler Primärenergie.

Empfohlen wird ein stufenweises Vorgehen nach dem Grundsatzentscheid bezüglich Heizzentrale, wonach zuerst die Wärmerückgewinnung in der Rohrfabrik, dann die Umbaumaßnahmen der Produktionsanlagen und abschliessend der Bau der Heizenergiezentrale bis zu Beginn des Jahres 1997 realisiert werden soll.

3.5 Pinch-Design-Methode und Prozesstechnik

Nach dem Zwiebelschalenmodell ist das Vorgehen so, **dass** zuerst der Prozess und erst dann das Wärmetauschernetzwerk optimiert werden soll. Die Prozessoptimierung an sich kann nur beschränkt mit der PDM vorgenommen werden, v.a. dann, wenn Stoffaustausch stattfindet. So ist es zum Beispiel schwierig, den **Trocknungsprozess** mit seinen Stoffaustauschvorgängen mit der PDM zu optimieren. Hingegen ist es möglich, physikalische Umwandlungen ohne Stoffaustausch (z.B. Schmelz- oder Erstarrungsvorgänge) in die PDMA Analyse einzubeziehen (siehe Kasten 39).

Nebeneffekte: Während der PDM-Analyse werden mit der grundsätzlichen Denkweise alle den Prozess betreffende Vorgänge hinterfragt, dabei werden betriebliche Nichtidealtäten sozusagen 'by the way' entdeckt.

Anwendungsprobleme

Die untersuchten Beschichtungsanlagen der Firma Eternit AG stellen bezüglich der Anwendung der Pinch-Design-Methode **alles andere als einen Standardfall** dar, da das Produkt ein Feststoff ist und somit ein schwieriges Handling aufweist. Dies ergab Probleme beim Modellieren der Energieströme, da gewisse Wärmeübergänge zum vornherein nicht machbar sind (z.B. Eternitplatten mit Eternitplatten vorwärmen oder feuchte Abluft kann nicht direkt zur Vorwärmung von Platten verwendet werden).

Als Lösung ergab sich die Modellierung des Energieträgermediums auf einer anderen Stufe, nämlich Luft als Wärmetauschermedium. Dies machte aber auch zusätzliche Annahmen für Temperaturdifferenzen in den Trocknern nötig, um die Probleme vollständig beschreiben zu können.

Die **Pinch-Design-Methode** wird vor allem für komplexe Wärmesysteme mit **mindestens 3 Energieströmen** (z.B. Produkte, Trocknerabluft und Raumluft etc.), angewandt. Hingegen sind die Abwärmenutzungssysteme von Gebäuden oft einfach, wie z.B. in Fabrikgebäuden, wo warme Hallenluft in eine externe Alteranlage gefordert wird und danach gereinigt und mit möglichst wenig Verlusten wieder in die Halle zurückgeführt wird. Daher bringt eine Betrachtung mit Hilfe der Pinch-Design-Methode kaum Vorteile, verglichen mit herkömmlichen Methoden.

Es wurde versucht, beim Projekt Eternit zwei Anlagen bezüglich Wärmenutzung zu verknüpfen. Da zwei Beschichtungsanlagen örtlich sehr nahe beieinander liegen, bot sich ihre Kombination zuerst an. Die Berechnung ergab ein negatives Bild, d.h. durch wärmetechnische Verknüpfung beider Anlagen konnte der Energieverbrauch der kombinierten Anlagen verglichen mit den beiden Einzelanlagen nicht gesenkt werden.

Begründung: Beide Prozesse laufen auf den gleichen Temperaturniveaus ab. Eine Prozessintegration ist nur erfolgreich, wenn verschiedene Temperaturniveaus genutzt werden können.

Kasten 39

Zum Beispiel werden bei der Beschichtungsanlagen **Heisswasservorläufe** von 170 °C gefahren, während von den Prozessanforderungen her 130 °C genügen würden. Von den installierten Heizregistern her ist es aber nicht möglich, die **Heisswassertemperatur** zu senken, weil der Trockner zuwenig Leistung hätten.

3.6 Kommentar

Die Anwendung der Pinch-Design-Methode für dieses Demonstrationsprojekt zeigte, dass bei den Produktionsanlagen bedeutende Energie einsparungen im Bereich von 25 - 30% wirtschaftlichen Pay-back-Fristen zu erreichen sind. Ein Zusatzeffekt ergab sich aus der notwendigen genauen Energiedatenanalyse, **indem** Probleme und zusätzliche Einsparungsmöglichkeiten im Betrieb der Kundenfirma entdeckt wurden, welche nicht direkt im Zusammenhang mit der **Pinch-Analyse** standen.

Die untersuchten Beschichtungsanlagen der Firma Eternit AG stellen bezüglich der Anwendung der Pinch-Design-Methode alles andere als einen Standardfall dar, da die Produktionsanlagen geographisch dezentral betrieben werden und das Produkt ein Feststoff ist und somit ein schwieriges Handling aufweist. Die Probleme der Modellierung der Energieströme konnten gelöst werden, indem die Prozessanforderungen für die Luft als Wärmeübertragungsmedium anstelle der Platten selbst formuliert worden waren. Dieses Vorgehen erforderte aber auch zusätzliche Annahmen für Temperaturdifferenzen in den Trocknern, um die Probleme vollständig beschreiben zu können.

Es wurde gezeigt, dass eine Prozessintegration bei Trocknern für Feststoffplatten und bei Trocknern für Farbbeschichtungen **mit** dem Lösungsmittel Wasser durchführbar ist.

Mit den vorgeschlagenen Massnahmen und der neuen Energiezentrale in Blockheizkraftwerktechnik erreicht die Firma Eternit einen hohen Standard bezüglich **Energieeffizienz** und Umweltverträglichkeit.

4. Literatur

Allgemeine Literatur:

- [0.1] Elektrizität und Wärme, RAVEL im Wärmesektor Heft 1, 1994, Bundesamt für Konjunkturfragen, CH-3003 Bern.
- [0.2] Wärmerückgewinnung und Abwärmennutzung, RAVEL im Wärmesektor Heft 2, 1993, Bundesamt für Konjunkturfragen, CH-3003 Bern.
- [0.3] Wärmerückgewinnung in lufttechnischen Anlagen, Richtlinien 89-1, 2.Auflage, 1993, SWKI Schweizerischer Verein von Wärme- und Klima-Ingenieuren, CH-3001 Bern.

Literatur zu Kapitel 1:

- [1.1] Kornrekta News 1/93 - 5/93, - Optimierung von WRG-Anlagen, - Optimieren einer Wasser/Glykol-WRG-Anlage, - WRG + AWN, FreeCooling (Umluftkühlung), - FreeCooling bei Kühldecken, Konvekta AG, CH9015 St. Gallen-Winkeln, 1993.
- [1.2] Informationsblatt, Neue Generation von energetischen Optimierungsprogrammen, 1994, Konvekta AG, CH-9015 St. Gallen-Winkeln.

Literatur zu Kapitel 2:

- [2.1] Linnhoff B. et al., A user guide on process integration for the efficient use of energy, publié par «The Institution of Chemical Engineers, 1982 U.K.
- [2.2] Loecken P.A., Interactive Computer program used on the retrofit of a dewatering process AICHE Meeting, Houston, March 24-25, 1985.
- [2.3] Gourelia J.P., Integration thermique, Chap. 10. Guide pratique de l'énergie dans l'entreprise, ATEE, 94110 Arcueil (France), 1984.
- [2.4] Linnhoff B. and Alanis F.J., Integration of a new process into an existing site - A case study, ASME winter meeting, Chicago, 1988.
- [2.5] Favrat D. et Staine F., Integration énergétique de procédés industriels par la méthode du pincement. Publication EDMZ/OCFIM No 724.321 f, collection RAVEL Industrie, 1994.
- [2.6] Favrat D. and Staine F., An interactive approach to the energy integration of

thermal processes. Proceedings of the Int. Conf. on Computer Aided Learning and Instrumentation in Science and Engineering, Lausanne, sept. 1991.

- [2.7] Staine F. et Favrat D., Evaluation des économies d'énergie par la méthode du pincement dans une usine de fabrication de panneaux de plâtre. Entropie 164/165, 1991.
- [2.8] Krummenacher P., Staine F. and Favrat D., Process Integration Study at Swiss Brewery. CADDET Newsletter No 4 /1992.
- [2.9] Kemp I.C., Applications of the Time Dependant Cascade Analysis in Process Integration. Heat Recovery Systems and CHP, Vol 10, No 4, 1990.
- [2.10] Borel L., Thermodynamique et énergétique. Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, 1984.
- [2.11] Staine F., Bilan exergétique global du procédé de production d'acide méthoxyacétique, Rapport interne, Laboratoire d'Energétique Industrielle, EPFL, 1991.
- [2.12] Quinodoz B., Analyse énergétique préliminaire de l'établissement thermal de Lavey-les-Bains, Projet de semestre, Laboratoire d'Energétique Industrielle, EPFL, 1994.
- [2.13] Linnhoff B., Pinch-Analysis - A State-of-the-Art Overview, Trans IChemE, Vd 71, Part A, p 503 - 522, Sept. 1994.

Literatur zu Kapitel 3:

- [3.1] Morand R., Energiestudie mit der Pinch-Design-Methode bei der Eternit AG Niederurnen, CADDET Newsletter 4/1994 Internationale Energie Agentur IEA, Hrsg. Infoenergie 5200 Brugg
- [3.2] Morand R., Energiestudie mit der Pinch-Design-Methode bei der Schweizer Getränke AG Obermeilen, Schweizer Lebensmittel Industrie 9/10 1994, Hrsg. Latemser Food Consulting AG, 8762 Schwändi
- [3.3] Diggelmann D., Energiestudie mit der Pinch-Design-Methode bei der Ziegler Papier AG, Grellingen, Der Papierarbeiter, Juni 1995, Hrsg. Schweizerischer Papierarbeitgeberverband