



Bundesamt für Energie
Office fédéral de l'énergie
Ufficio federale dell'energia
Uffizi federal d'energia

19'272/ 58'854

Forschungsprogramm
Umgebungs- und Abwärme
Wärme-Kraft-Kopplung (UAW)



EF-Archiv Nr. 195 118

Einführung in die Prozess- integration mit der Pinch-Methode

Handbuch zum BFE-Kurs „Energieplanung in Industrie und Haustechnik“

ausgearbeitet durch

Raymond Morand (Projektleiter) und **Rainer Bendel**

Helbling Ingenieurunternehmung AG, Hohlstrasse 610, 8048 Zürich

Dr. Robert O. Brunner

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

Hanspeter Pfenninger

Konvekta AG, Letzistrasse 23, 9015 St. Gallen

im Auftrag des

Bundesamtes für Energie

Februar 1998

Zwischenbericht

Zusammenfassung

Das Bundesamt für Energie (BFE) unterstützt im Rahmen des Programms „Umwelt- und Abwärmennutzung (UAW)“ unter der Leitung von Prof. Dr. Martin Zogg die Umsetzung und Praxiseinführung der Pinch-Methode (PM).

Die Pinch-Methode (PM) wurde in den frühen 80-er Jahren an der Universität Manchester entwickelt und in der englischen chemischen Industrie eingesetzt. Von dort aus fand sie Einzug in die verfahrenstechnische Industrie verschiedener Länder. In der Literatur existieren einige Erfolgsberichte über Industrieanwendungen aus allen Branchen. Die Anwendungen beschränken sich aber nicht nur auf die Prozess/Verfahrenstechnik, sondern die PM liefert auch in der Haustechnik substantielle Beiträge zu optimalen Anlagen.

Die PM wird in der Schweiz schergewichtig an der ETH-Lausanne am LENI (Laboratoire d'énergetique industrielle) unter der Leitung von Prof. Dr. Daniel Favrat betrieben. International ist das Programm UAW in die Internationale Energie Agentur (IEA) eingebettet. Zur Verbreitung der Anwendung der PM wurde in der Schweiz ein National Team of Process-Integration auf die Beine gestellt.

Im Rahmen dieser Tätigkeiten wurde das Projekt „Umsetzung der Pinch-Methode in die Praxis“ mit dem Ziel der Verbreitung der Anwendung der Pinch-Methode lanciert. Aus dieser Tätigkeit entstand ein eintägiger BFE-Kurs sowie das vorliegende Handbuch.

Die Begleitgruppe bestand aus den Herren D.Favrat (ETH-Lausanne), T.Bürki (Energie 2000), M.Zogg (Programmleiter UAW), M.Brunner (BFE). Die Beiträge in diesem Handbuch stammen aus den Federn von R.Morand (Projektleitung), R.Brunner, R.Bendel und Hp. Pfenninger. Die Autoren sind theoretisch und praktisch in der Energie- und der Verfahrenstechnik tätig. Zudem kommt dem Handbuch die praktische Erfahrung von R.Morand und R.Bendel mit der PM zugute.

Der Nutzen der PM reicht von optimierten neuen sowie bestehenden Anlagen bis zu neuen Einsatzzwecken als Bewertungsinstrument für Bewilligungsverfahren oder für Umweltmanagementsysteme. Die besondere Sichtweise der PM hilft, sich etwas aus den ausgetretenen Pfaden der konventionellen Methoden zu befreien und auf neue Lösungen zu stossen. Wertvoll dürften auch die absoluten Aussagen bezüglich realistischem Potential einer Anlage sein verglichen mit den heute vorherrschenden relativen Aussagen.

Das Handbuch schafft einleitend eine gemeinsame Basis für alle beteiligten Sparten durch die Definition der verwendeten Begriffe. Von den thermodynamischen Grundgleichungen ausgehend wird die Sichtweise der PM schrittweise dargelegt. Die PM ist keine Wunderwaffe; durch den stark strukturbezogenen Blickwinkel erlaubt sie aber die Überwindung von Fixierungen, die durch die konventionelle Art des Modellierens bei Anlagen und Prozessen entstehen können.

Die Prozessintegration (PI) ist ein Oberbegriff der Pinch-Methode und hat die Gesamtoptimierung von technischen Systemen zum Ziel, im besonderen technische Anlagen. Prozessintegration ist im allgemeinen nicht nur auf Maschinen und technische Anlagen beschränkt, ihre Anwendung kann auf verschiedene andere Prozesse übertragen werden; so handelt es sich doch bei der PI um einen universellen Ansatz.

Die aufgeführten Beispiele zeigen, dass es sich nicht um eine akademische Spielerei, sondern um ein effizientes Werkzeug handelt, das allerdings richtig in die Hände genommen werden will.

Die Autoren versuchen mit diesem Handbuch, ihr Wissen über die Methode weiterzugeben. Sie sind an Rückmeldungen über Erfahrungen sehr interessiert und schätzen jede Art der Kontaktnahme.

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Die definitive Fassung des Schlussberichts wird Ende Oktober 1998 erscheinen.

Einführung in die Prozessintegration mit der Pinch-Methode

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG	5
2. PROZESSINTEGRATION UND PINCH-METHODE	7
2.1 Vorbemerkung	7
2.2 Prozessintegration	7
2.3 Pinch-Methode	8
3. ENERGIESYSTEME UND -BILANZEN	10
3.1 Die Begriffe „System“ und „Bilanz“	10
3.2 Beispiel Systemabgrenzung	12
3.3 Übung Systemabgrenzung und Energiebilanz	12
4. GRUNDLAGEN	13
4.1 Theorie	13
4.2 Beispiel	15
5. MODELLIERUNG UND DEFINITION DER PROZESSANFORDERUNGEN	17
5.1 Vorbemerkung	17
5.2 Datenextraktion	17
5.3 Beispiel Datenextraktion	17
5.4 Übung Datenextraktion	19
5.5 Prinzipien der Datenextraktion	19
6. ZIELWERTFINDUNG MIT VERBUND- UND WIRTSCHAFTLICHKEITSKURVEN	20
6.1 Vorgehensprinzip	20
6.2 Verbundkurven	20
6.3 Wirtschaftlichkeitskurven	23
6.4 Energetischer Optimierungsgrad	24
6.5 Beispiel Zielwertfindung	25
6.6 Übung Zielwertfindung	26
7. DESIGN	27
7.1. Vorgehensübersicht	27
7.2 Netzwerkdarstellung	27
7.3 Netzwerkentwurf	28
7.4 Einschränkungen	31
7.5 Übung Netzwerkentwurf	32



8. OPTIMIERUNG DER ENERGIEVERSORGUNG	33
8.1 Zielsetzung	33
8.2 Gesamtverbundkurven	33
8.3 Utility Placing	35
8.4 Beispiel Utility Placing	37
8.5 Total Site Konzept	38
9. PLANUNGSHIERARCHIE MIT DEM ZWIEBELSCHALENMODELL	39
10. VERBINDUNG MIT DER HAUSTECHNIK	41
10.1 Schnittstelle Verfahrenstechnik-Haustechnik	41
10.2 Optimierung mit Gebäude-Simulationsprogrammen	41
10.3 Mögliche Kombination von Gebäude-Simulation und PM	43
11. SANIERUNG VON PRODUKTIONSANLAGEN	44
12. FALLBEISPIELE	46
12.1 Chemieanlage	46
12.2 Resultate von 6 Fallbeispielen	50
13. ANWENDUNG IN DER PRAXIS	51
13.1 Auswahl von bestehenden Anlagen und Projektchallenging von Neuanlagen	51
13.2 Ablauf einer Energiestudie mit der Pinch-Methode	51
13.3 Anwendungsprobleme (Stolpersteine)	51
14. ABWASSERMINIMIERUNG	53
15. AUSBLICK	55
16. LITERATURVERZEICHNIS	56
ANHANG A: ÜBUNGEN UND LÖSUNGEN	57



1. Einleitung

Ziel jeder Planung oder Sanierung einer technischen Anlage ist ein möglichst effizienter Einsatz der Energie, wobei Faktoren wie effiziente Produktion und Produktequalität einen hohen Standard aufweisen müssen.

In Industriebetrieben sind deshalb die Bedürfnisse des technischen Dienstes der Haustechnik sekundärer Natur bei betriebsweiten energetischen Optimierungen verglichen mit den Bedürfnissen des Verfahrensingenieurs.

Durch die Beschäftigung der involvierten Sparten mit der Prozessoptimierung wird der Dialog und damit das gegenseitige Verständnis gefördert. Solange die einzelnen Anlagen im Inselbetrieb gefahren werden, sind interdisziplinäre Gedankengänge nicht zwingend. Durch die Möglichkeiten der energetischen Vernetzung bei der Anwendung von Abwärme- und Wärmerückgewinnungstechniken für optimale Lösungen gewinnen spartenübergreifende Überlegungen zunehmend an Bedeutung. Daher und durch die gemeinsame Nutzung von Planungswerkzeugen erfährt die Qualität der Kommunikation in interdisziplinären Projekten eine grosse Aufwertung.

Entscheidend für die Qualität der Kommunikation ist die Verwendung eines gemeinsamen Vokabulars mit Begriffen, die jeder Beteiligte mit gleichem Inhalt füllt.

Die Pinch-Methode (PM), die ihre Wurzeln in der Verfahrenstechnik hat, ist auch auf die Haustechnik anwendbar. Die PM hat in erfahrenen Händen einen starken Praxisbezug.

Neu ist, dass mit der PM physikalisch begründete Zielwerte bezüglich der Energie einer Anlage aufgestellt werden können. Der praktische Nutzen der hier vorgestellten Methoden liegt in der klaren Zielsetzung und in der Einnahme eines von der Vorgeschichte unabhängig eingenommenen Sichtwinkels. Unter Prozessintegration werden alle Methoden der Prozessoptimierung verstanden, die sich nicht nur mit Einzelprozessen auseinandersetzen. Die Haustechnik ist ebenfalls ein Prozess, der unter diese Kategorie fällt. Einfache Anlagen mit bekannten Schaltungen sind nur in Ausnahmefällen damit zu verbessern. Durch die Einführung der Wärmerückgewinnung und der Abwärmenutzung entstehen eine Vielfalt von Anlagen mit komplexen Energieflüssen, die nicht auf den ersten noch auf den zweiten Blick zu durchschauen sind. Hier hakt die PM als taugliches Hilfsmittel ein. Mit den Verbundkurven und deren

Lage ist sofort eine Aussage über die energetische Optimierung möglich.

Die „learning curve“ (Bild 1) zeigt die Vorteile der Pinch-Methode gegenüber Zeitreihenmethoden (Vergleich mit Jahresstatistiken) und Benchmarking (Vergleich mit dem Spitzenreiter) auf, welche nur relative Vergleichswerte bzw. relative Positionierungen ergeben, verglichen mit den **absoluten Zielwerten**, die mit der Pinch-Methode erhalten werden.

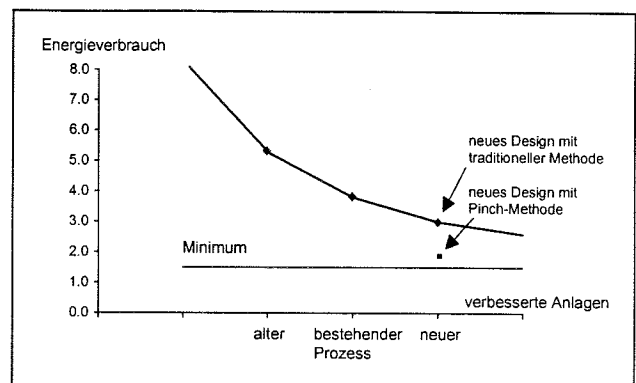


Bild 1: Lernkurve

Das vorliegende Handbuch zeigt dem geeigneten Leser einen möglichen Einstieg in das Thema Energieoptimierung mittels Prozessintegration und Pinch-Methode. Als „roter Faden“ dient ein **vereinfachtes Anlagenbeispiel aus der Praxis**, an dem die entsprechenden Schritte vordemonstriert werden. Zusätzliche Übungsbeispiele untermauern die dargestellten theoretischen Aussagen. Den Schluss bilden detailliert erläuterte Fallbeispiele aus der Praxis sowie eine Anleitung zum Einsatz der PM.

Funktionsbeschreibung des Beispiels:

Im Beispiel (Bild 3) ist eine typische prozesstechnische Anlage zur Herstellung von Spezialchemikalien (Pigmente, Additive, ...) vereinfacht dargestellt. Ein Produkt K1 tritt mit einer Anfangstemperatur von 30°C in die Anlage ein. Der Wärmekapazitätsstrom beträgt 9 kW/K. Das Produkt K1 wird im Wärmetauscher W1 mit 450 kW auf 80°C und anschliessend im Erhitzer E1 mit 360 kW auf 120°C aufgeheizt. Mit dieser Temperatur gelangt das Produkt K1 in den Mischer R1. Beim Mischungsvorgang wird Wärme frei. Ein Teil der Mischung wird dem chemischen Reaktor R2 zugeführt und zusätzlich beheizt. Der andere Teil der Mischung sowie das Produkt aus dem chemischen Reaktor werden in eine Trennkolonne K1 geführt und in 2 Fraktionen aufgetrennt. Die flüchtigere Fraktion wird kondensiert und einenteils direkt in die Trennkolonne K1 und andernteils über den Wärmetauscher W2 und den Erhitzer E2 mit 100°C in den Mischer R1 geführt. Die weniger flüchtige Fraktion verlässt über den Wärmetauscher W2 und den Produktkühler Kü1 mit einer Temperatur von 30°C die Anlage.

Eine erste Übung (siehe Kasten 2) zeigt die Vorteile der PM. Die Aufgabe besteht darin, eine prozesstechnische Anlage (siehe Bild 3) zu verbessern. In den Grundzügen entspricht sie einer üblichen industriellen Anlage, wobei sie aus didaktischen Gründen etwas vereinfacht wurde. Sie soll mit bekanntem Wissen und eigener Erfahrung energetisch verbessert werden.

Lösung: Die minimalen Werte für den Heiz- und Kühlbedarf betragen: 100 kW_{th}, resp. 140 kW_{th}.

Mit zunehmender Vertrautheit mit der PM kann obige Anlage mit dieser neu eingeführten Methode optimiert und mit den ursprünglichen Resultaten verglichen werden.

Kasten 2

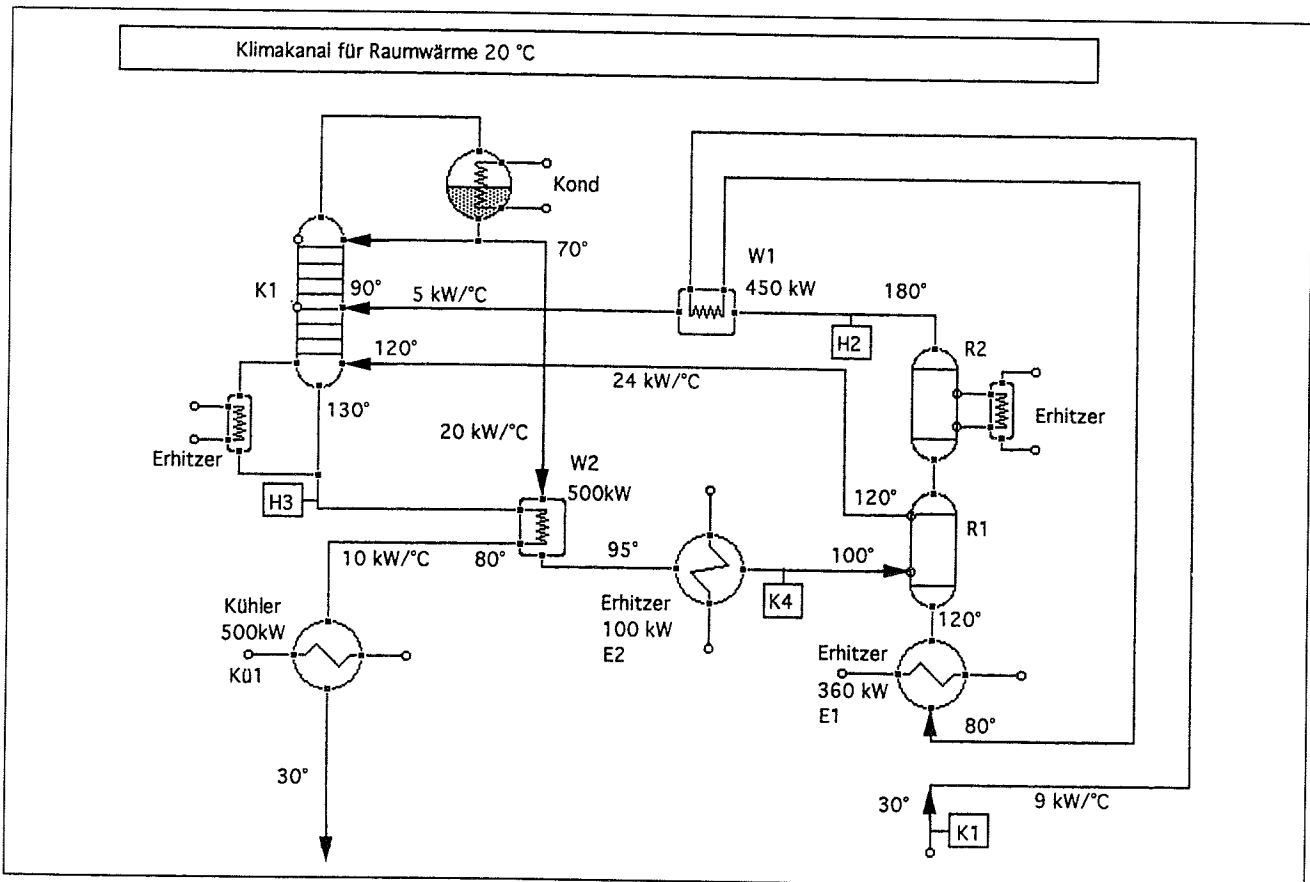


Bild 3: Bestehende Anlage

2. Prozessintegration und Pinch-Methode

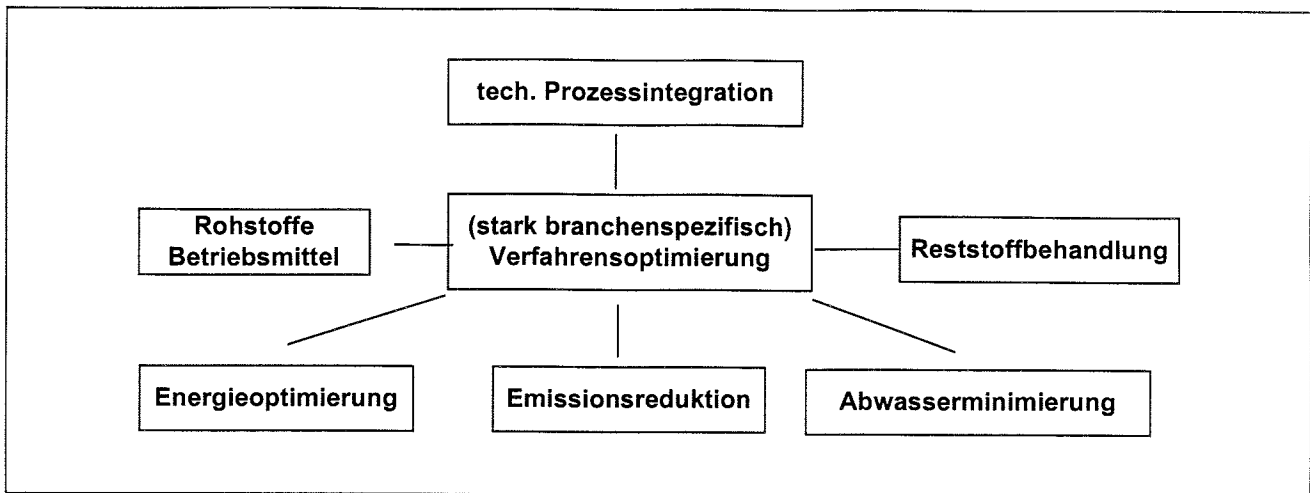


Bild 4: Umfeld der Prozessintegration

2.1 Vorbemerkung

Prozessintegration ist der Oberbegriff einer Methodik, die die Gesamtoptimierung von Systemen aus dem Umfeld Prozess-/Verfahrens- und Energietechnik zum Ziel hat. Dabei wird der Energieeinsatz und/oder Stoffmenge bezüglich Investitions- und Betriebskosten optimiert.

Zentral ist die Verfahrensoptimierung (Bild 4) die stark spartenspezifisch ist. In weiteren Schritten werden die Bereiche Energie, Wasser, Rohstoffe, etc. optimiert.

2.2 Prozessintegration

Prozessintegration ist der gebräuchliche Sammelbegriff für systemorientierte und integrale Ansätze, um industrielle Prozesse und Anlagen hinsichtlich Investitions- und Betriebskosten, Energieverbrauch, Flexibilität und Emissionen zu optimieren. Da die energietechnischen und insbesondere die haustechnischen Anlagen eine Untermenge dieser oben beschriebenen Anlagen darstellen, lassen sich die erwähnten Methoden ebenfalls mit Erfolg einsetzen.

Die Methoden der Prozessintegration führen zu einem systematischen Vorgehen für die optimale Konzeption neuer und für die Verbesserung bestehender Produktionsanlagen der Verfahrens-,

Energie- und komplexeren Haustechnik. Sie reichen von Einzelprozessen bis zu ganzen Chemie- und Energieanlagen. Ziel der Prozessintegration ist, einen Prozess bei gefordertem Durchsatz und Produktequalität mit einem minimalen Energie- und Ressourcenbedarf sowie minimalen Emissionen durchführen zu können. Dabei sind die Randbedingungen hohe Sicherheit und Flexibilität sowie gute Regulier- und Bedienbarkeit der Anlage einzuhalten.

Somit beschränkt sich die Prozessintegration nicht nur auf das systematische Aufsuchen einer energetisch optimalen Lösung für Gesamtanlagen. Sie lässt sich auch auf die in einer Anlage auftretenden Stoffströme anwenden. Für eine verfahrenstechnische Anlage als System, bestehend aus Reaktoren und Stoffaustauschapparaten können als zusätzliche Ziele beispielsweise minimaler Prozesswasser- und Kühlwasserverbrauch (Mehrfachverwendung!), minimaler Abwasserstrom und minimale gasförmige Emissionen angestrebt werden.

Verfahrens-, Energie- und Haustechnikingenieure können mit den Methoden der Prozessintegration in der Konzeptphase von Anlagenprojekten wesentlich rascher zu optimalen Systemlösungen kommen. Auch zur Analyse und Sanierung bestehender Anlagen profitieren die Planer von einem raschen Erkennen des Verbesserungspotentials und einer systematischen Lösungsfindung.

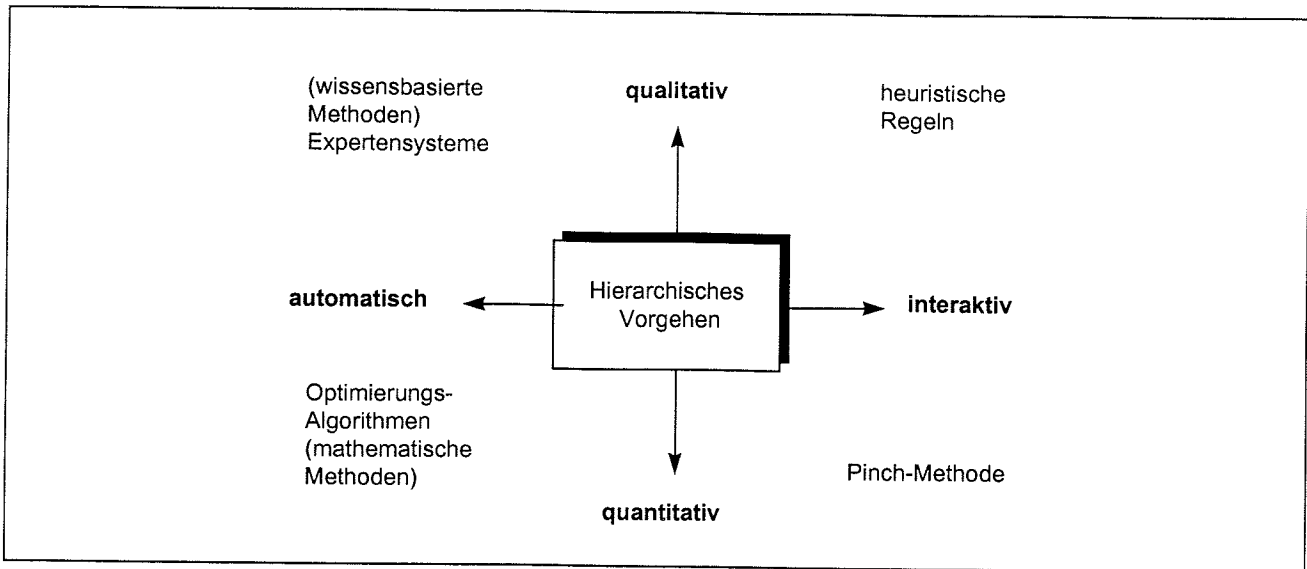


Bild 5: Einteilung der Prozessintegrationsmethoden [aus 3]

Im Begriff Prozessintegration sind verschiedene Methoden thermodynamischer, mathematischer und ökonomischer Art enthalten. (Bild 5) zeigt eine Einteilung dieser Methoden, klassifiziert nach den Kriterien interaktiv, automatisch, qualitativ quantitativ. Die hier im Vordergrund stehende Pinch-Methode wird in England häufig, in der schweizerischen Industrie hingegen nur selten angewandt. Die anderen Methoden sind vorerst Hochschulen und Universitäten vorbehalten, da eine genügende Anwenderfreundlichkeit noch nicht gegeben ist.

2.3 Pinch-Methode

Die Pinch-Methode ist das wichtigste und bisher am weitest entwickelte Instrument der Prozessintegration. Sie ist nicht nur in prozesstechnischen Industrieanlagen, sondern bei allen wärmetechnischen Systemen einsetzbar. In komplexen Anlagen ist sie ein ideales Werkzeug zur Erlangung eines Überblickes. Sie ermöglicht, ausgehend von den Prozessanforderungen, die Berechnung des physikalisch notwendigen minimalen Energieeinsatzes der Prozesse. Sie erlaubt, bei bestehenden Anlagen den energetischen Optimierungsgrad festzustellen, Energiesparpotentiale aufzuzeigen und dient als Arbeitsinstrument zur Auslegung der vorgeschlagenen Änderungsmassnahmen. Methoden für die optimierte Implementierung von Wärmepumpen und Anlagen der Wärmekraftkopplung, zur Optimierung hinsichtlich Schadstoffemission und Betriebskosten erweitern die Anwendungsmöglichkeiten.

Pinch-Methode: Die Darstellung aller Wärmeübertragungs-Verbindungen zwischen Stoffströmen einer Anlage heisst Wärmeübertrager-Netz. Es gibt verschiedene Methoden zur Unterstützung des Entwurfs solcher Netze für gegebene, stationäre Betriebsbedingungen. Sie beruhen darauf, dass für einen Satz aufzuheizender und abzukühlender Stoffströme mit gegebenen Anfangs- und Endtemperaturen das theoretische Minimum der von aussen zuzuführenden Energie bestimmt werden kann. Eine einfache Methode ist die Pinch-Methode (auch "Pinch Based Design", "Pinch Point Method"). Sie wird ergänzt durch Optimierungsmethoden des Netzes für ein ganzes Spektrum sich ändernder Betriebsbedingungen. Die Pinch-Methode verdankt ihre Bezeichnung der typischen Einschnürung (engl. pinch) der zwei Verbundkurven (heiss, kalt) im Enthalpie-Temperatur-Diagramm, die je aus der Summe der Enthalpien in den betrachteten Temperaturintervallen aller wärmeabgebenden (heissen) und wärmeaufnehmenden (kalten) Stoffströmen gebildet werden. Diese minimale Temperaturdifferenz beim Pinch tritt bei einer bestimmten Enthalpie auf. Der Bereich der Kurvenüberlappung parallel zur Enthalpieachse ergibt den maximal möglichen Wärmehintergewinn. Mit der Methode kann die Güte verschiedener Wärmeübertrager-Netzwerke global bestimmt werden. Über die Ermittlung der minimalen Temperaturdifferenz kann der maximale Wärmehintergewinn berechnet, die Netzwerkgrösse und die Kosten abgeschätzt werden.

Kasten 6

Die Basismethode funktioniert für kontinuierliche Anlagen. Für Systeme mit zeitlich variablem Charakter (z.B. Batch- oder Mehrzweckanlagen) sowie für Wärmekraftmaschinen oder Wärmepumpen stehen zusätzliche Methodikmodule zur Verfügung.

Eine Wörterbuch Definition als Kurzerklärung ist im Kasten 6 zu finden [21].

In Kasten 7 zeigt die Praxisdefinition Ziel und Anwendung):

Die Pinch-Methode ist die kostengünstige und einfache Methode zur Beantwortung der folgenden wichtigen Fragen,

➤ wie gross ist der minimal notwendige Energieeinsatz für den aktuellen Produktionsprozess, wenn eine vollständig optimierte Anlage vorliegen würde?

und

➤ wo liegt das Optimum für die Energie- und Investitionskosten?

Kasten 7

Die Pinch-Methode als effiziente Methode zur Systemauslegung nützt jedem Verfahrens- und Energieingenieur bei der Planung und Optimierung neuer wie auch zur Analyse und Verbesserung bestehender Anlagen der Prozess-, Energie- und komplexeren Haustechnik. Sie ermöglicht eine Optimierung von Gesamtsystemen in der Grobkonzeption und Detailauslegung. Sie lässt aber auch das wirtschaftlich sinnvolle Energiesparpotential bei bestehenden Anlagen erkennen und dient als Werkzeug für die Konzeption von Verbesserungsmaßnahmen.

Die **Gesamtzielsetzung der Prozessintegration** und damit auch der Pinch-Methode ist die Optimierung der Anlagen auf den Stufen Prozess, Wärmetauscher und Infrastrukturanlagen hinsichtlich Betriebs- und Kapitalkosten durch Integration in das „Ganze“. Das „Ganze“ wird durch den Anlagenplaner oder -betreuer durch das Ziehen der Systemgrenzen festgelegt.

Beim Optimierungsvorgang müssen Kriterien wie Flexibilität, Anlagenkontrollierbarkeit und Sicherheit genauso berücksichtigt werden wie die „klassischen“ Kriterien Energieverbrauch und Investitionen.

Es gilt durchgehend der folgende Grundsatz:

**Bessere Anlagen durch
bessere Prozessintegration!**

Generell fördert die Anwendung der Prozessintegration das Systemdenken und dient den Zielen einer nachhaltigen Entwicklung. Im raschen Erkennen optimaler Systemkonfigurationen leistet die Prozessintegration hervorragende Dienste bezüglich der zunehmend notwendiger werdenden Ressourcenschonung.

3. Energiesysteme und -bilanzen

3.1 Die Begriffe „System“ und „Bilanz“

Als System wird der Bereich einer Anlage oder einer Komponente bezeichnet, der einer systemtechnischen Untersuchung unterworfen wird.

Bei einem Energiesystem besteht das System aus Anlagen und Komponenten, in denen Energieumwandlungen ablaufen.

Grösse und Inhalt eines Systems hängen von der jeweiligen Fragestellung ab. Bei der Optimierung einer haustechnischen Energieversorgungsanlage umfasst es alle Wärmeerzeuger, die Verteilung und die Wärmeabgabekomponenten. Bei einer Wärmepumpe auf dem Prüfstand hingegen interessiert nur die Grundkomponente bis zu den Anschlussstutzen. Ebenfalls kann eine Produktionsanlage isoliert vom Umfeld betrachtet werden.

Systeme weisen grundsätzlich verschiedene Eigenschaften auf:

- in einem **geschlossenen System** bleibt die Stoffmenge unverändert. Typisches Beispiel dafür ist die Kühltruhe, wobei die Systemgrenzen die gesamte Anlage umschliessen.
- ein **offenes System** wird durch einen definierten Bereich gegen die Umwelt abgegrenzt. Das Fernheizkraftwerk ist ein typischer Vertreter. Charakteristischerweise fliessen Stoff- (Brennstoff) und Energieströme (Wärmestrom) über die Systemgrenzen hinweg.
- in einem **abgeschlossenen System** findet weder Stoff- noch Energieaustausch mit der Umgebung statt.
- in einem **adiabaten System** findet wegen der idealen (angenommenen) Wärmedämmung kein Wärmeaustausch statt.

Der Wahl der **Systemgrenzen** kommt bei wärmetechnischen Untersuchungen eine grosse Bedeutung zu. Die **Systemgrenzen** werden entsprechend den Anforderungen der Untersuchung bestimmt. Im System, bzw. an den Systemgrenzen muss der 1. Hauptsatz der Thermodynamik erfüllt sein. Mit andern Worten: **Das Prinzip der Erhaltung der Energie muss erfüllt sein!**

Anschaulich kann die Erhaltung der Energie mit dem Energieflussdiagramm gezeigt werden. Das Energieflussdiagramm besteht aus Pfeilen, deren Breite proportional zur Energie gewählt wird. Die

Summe der über die Systemgrenzen zu- (+) und weggeführten (-) Energie muss Null sein.

Das Energiefluss-Diagramm (auch Sankey-Diagramm) ist eine etablierte Darstellungsart im Bereich der Energieanalyse. Es dient der Veranschaulichung der Energiebilanz (siehe Bild 17).

Beispiele für **Energieströme** sind

- ▶ Wärmeströme wie Rauchgas, Abdampf, warmes Prozesswasser, warmes Produkt etc.
- ▶ mech. Leistungen aus Verbrennungs- und Elektromotor, Gasturbinen etc. aus denen elektrischer Strom erzeugt werden kann sowie elektrischer aus dem Netz des Elektrizitätswerkes

Beispiele von **Energiesystemen** mit den jeweils gesuchten Zielgrössen:

1. Personenwagen zur Ermittlung des Fahrzeugwiderstandes und des Treibstoffverbrauches mit Hilfe der Wirkungsgrade. Das Energiesystem umfasst das ganze Fahrzeug mit den Systemgrenzen Reifen-Strasse und Karosserie-Aussenluft (Bild 8).
2. Gebäude mit Energieversorgung für Wärme, Kälte, Elektrizität und Gebäudehülle. Im Vordergrund steht die Ermittlung der maximalen Heizleistung und des Jahresenergieverbrauches. Das Energiesystem besitzt die Systemgrenzen Hausboden-Erde, Hauswand-Aussenluft, Fenster-Aussenluft etc. sowie die Auslassöffnungen von Lüftungen, Kamin, Fenster usw. Die Bewohner zählen zu den internen Wärmequellen.(Bild 9).
3. Bierbrauereianlage zur Ermittlung der Heiz- und Kälteleistungen und des entsprechenden Energieverbrauches pro Jahr. Das zweckmässige Energiesystem ist hier die ganze Produktionsanlage mit allen Teilprozessen wie Aufheizen, Kochen, Abkühlen etc. In diesem Fall schneiden viele Energieströme die Systemgrenze wie das zu- und abgeführte Heisswasser als Heizenergie und zu- und abgeführtes Kaltwasser aus der Kältemaschine sowie Verlustwärmern wie Abstrahlung von Behälter und Rohren, verdampftes Wasser beim Kochen usw. Zusätzlich wird Energie benötigt für Produktumwandlungen, im Fall der Brauerei wird aber auch Wärme frei (z.B. bei der Gärung). Aus all diesen Grössen kann nun eine Energiebilanz erstellt werden, wonach die Zielgrössen Heiz- und Kälteleistung bestimmt werden können (Bild 10).



Allen angeführten Beispielen gemeinsam ist, dass die Systemgrenzen im Hinblick auf den geringsten Aufwand zur Ermittlung der Zielgrösse optimal gewählt wurden.

Wärmeleistung statt Wärmeenergie:

Bei **kontinuierlichem** oder **stationärem** Betrieb von Anlagen und Komponenten kann mit der mittleren Energie über den Beobachtungszeitraum gearbeitet werden. Energie pro Mittelungszeit ergibt die Dimension der Leistung, sodass oft in den erwähnten Fällen mit der Wärmeleistung gearbeitet wird.

Bei der Bilanzierung mit Wärmeleistungen statt mit Wärmeenergien können die gleichen Überlegungen gemacht werden, nur dass zeitlich abhängige Grössen wie Massenströme und Energieströme wie z.B. Heizleistungen mit 1000 kg/h Dampf berücksichtigt werden müssen.

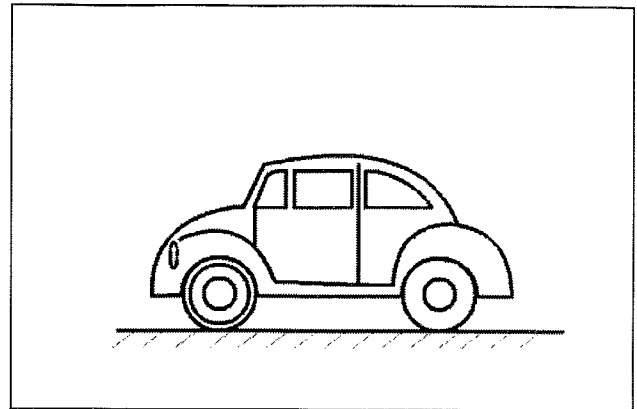


Bild 8: Energiesystem Personenwagen

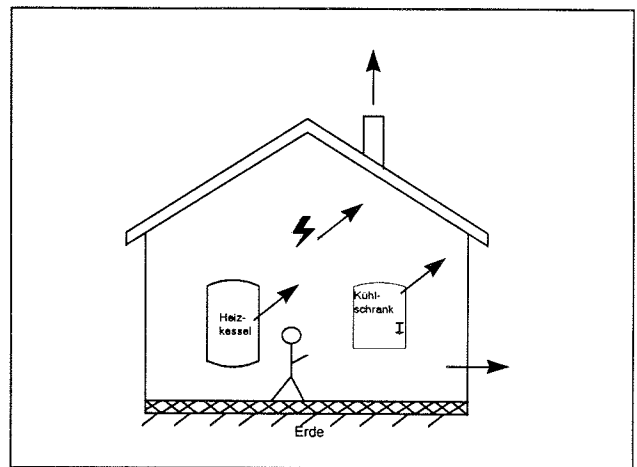


Bild 9: Energiesystem Haus

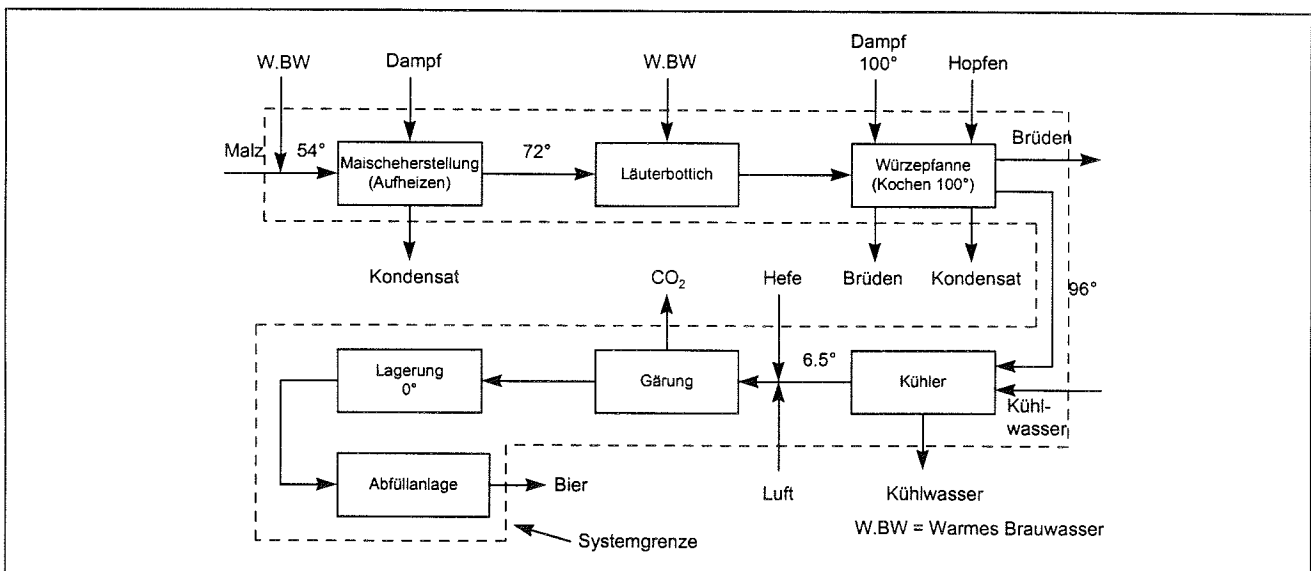


Bild 10: Energiesystem Bierbrauerei

3.2 Beispiel Systemabgrenzung

Als einfaches Beispiel diene die Pasteurisierung von Milch (Siehe Bild 16 und zugehörige Erklärung).

Die Systemgrenzen der Anlage werden derart gelegt, dass das erhitzte und wieder abgekühlte Gut, sowie die zusätzliche Heizung und die Kühlung erfasst werden. Die Wärmerückführung (WRG) erfolgt innerhalb des Systems und ergibt eine grosse Energieeinsparung. Die Optimierung der Pasteurisationsanlage kann mit der PM zuverlässig durchgeführt werden.

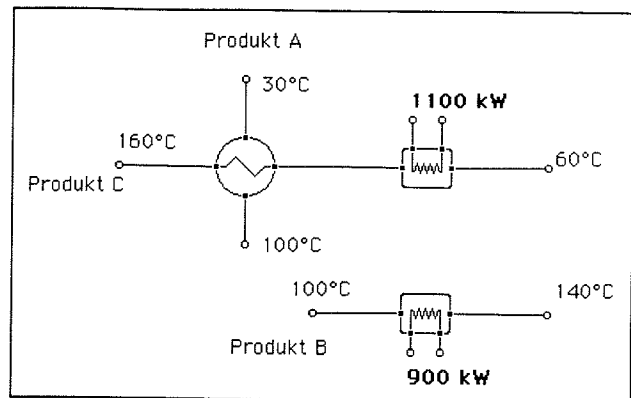


Bild 11: Übungsbeispiel Energiesystem

3.3 Übung Systemabgrenzung und Energiebilanz

Für nebenstehendes Energiesystem (Bild 11) ist eine Systemabgrenzung durchzuführen, sowie anschliessend die vollständige Massen- und Energiebilanz zu erstellen.

Ergänzende Angaben sind:

- Massenstrom des Produkts C: 10 kg/s,
- c_p der Produkte A und B: 4 kJ/(kg·K),
- c_p des Produkts C: 1.4 kJ/(kg·K).

Lösung und Lösungsblatt befinden sich in Anhang A10 und A11.

📖 Eine gute Einführung und Vertiefung der Systemlehre im Anlagenbereich findet man in [1].

4. Grundlagen

4.1 Theorie

Bei der rationellen Energienutzung spielt die Temperatur eine entscheidende Rolle. Im vorhergehenden Kapitel wurde beim Aufstellen der Energiebilanz nicht gross auf die Temperatur Rücksicht genommen. Die Qualität „Temperatur“ wird mit dem Exergiebegriff eingeführt.

Eine bestimmte Energieform lässt sich in den wenigsten Fällen vollständig umwandeln. Energie wird deshalb aufgeteilt in Anergie und Exergie. Exergie ist dabei der Teil der Energie, der sich in nutzbare Energie umwandeln lässt. Anergie ist derjenige Anteil, der nicht weiter genutzt werden kann. Beispielsweise ist bei der Heizwärme die Exergie umso grösser, je grösser die Temperaturdifferenz zwischen dem Wärmeträger und der Umgebung ist.

Wärme kann somit nur bis zu einer Referenztemperatur genutzt werden. Bei der WRG ist deshalb dafür zu sorgen, dass die Wärme über möglichst viele Temperaturstufen, auch als Temperaturkaskade bezeichnet, genutzt werden kann. Diese Aufgabe kann elegant mit der Pinch-Methode gelöst werden.

In der Thermodynamik wird die Summe von innerer Energie und Verschiebearbeit als Enthalpie H bezeichnet. Da nur Anfangs- und Endzustand von Interesse sind, steht die Enthalpiedifferenz im Vordergrund. Ist die innere Energie nur von der Temperatur abhängig, so lässt sich die Enthalpiedifferenz ΔH über die Temperaturdifferenz berechnen.

$$\Delta H = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (1)$$

mit

ΔH = Enthalpiedifferenz [J], [kJ]

m = Masse [kg]

c_p = spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck [J/(kg·K)]

T_2 = höhere Absoluttemperatur [K]

T_1 = tiefere Absoluttemperatur [K]

Die Enthalpiedifferenz stellt die Wärmemenge Q bei der entsprechenden Temperaturänderung dar. Anstelle der Enthalpiedifferenz wird mit der Wärmemenge Q gerechnet.

Bei **stationären Vorgängen** wird die **Wärmemenge Q** durch die **Wärmeleistung \dot{Q}** ersetzt, die auch als **Wärmestrom** bezeichnet wird.

Der zur Erwärmung oder Abkühlung eines Massenstromes zu- oder abzuführende Wärmestrom beträgt:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta \vartheta \quad (2)$$

mit

\dot{Q} = Wärmestrom (Wärmeleistung, Kälteleistung) [W]

\dot{m} = Massenstrom [kg/s]

c_p = mittlere spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck [J/(kg·K)]

$\Delta \vartheta$ = Temperaturdifferenz [K]

$$\Delta \vartheta = \theta_2 - \theta_1 = T_2 - T_1$$

θ_1, θ_2 = Temperatur [°C]

T_1, T_2 = Temperatur [K]

In prozesstechnischen Anlagen bleiben die Eigenschaften der Wärmeträger über die gewählten Beobachtungszeiträume vielfach konstant, sodass sich eine verkürzte Schreibweise bewährt. Durch das Einführen des Wärmekapazitätsstroms CP , - auch als Wasserwert bekannt, - kann Gleichung (2) übersichtlicher geschrieben werden.

$$CP = \dot{m} \cdot c_p \quad (3)$$

mit

CP = Wärmekapazitätsstrom [W/K] oder identisch [W/°C]

Damit lautet die Gleichung (2):

$$\dot{Q} = CP \cdot \Delta \vartheta \quad (4)$$

Bei der PM wird in den Anlagenschemata oft anstelle des Massenstroms \dot{m} der Wärmekapazitätsstrom CP angegeben. Dadurch können die verschiedenen Wärmeströme einfacher quantifiziert werden.



Das im Kapitel 6 vorgestellte Pinch-Diagramm ist eine Abbildung der Anlage im Enthalpie-Temperatur-Raum, resp. Enthalpiestrom-Temperatur-Raum (siehe Bild 24) gemäss Gleichung (5):

$$\Delta g = \theta_2 - \theta_1 = \frac{1}{CP} \cdot \dot{Q} \quad (5)$$

Aus der folgenden Umformung ist ersichtlich, dass **der reziproke Wert von CP der Steigung im T-H-Diagramm entspricht.**

$$\frac{1}{CP} = \frac{1}{\dot{m} \cdot c_p} = \frac{\Delta g}{\Delta \dot{Q}} = \frac{\Delta T}{\Delta \dot{Q}} \quad (6)$$

Bei der Beurteilung der thermischen Leistung spielt die Temperatur eine entscheidende Rolle. Zur Potentialabschätzung bezüglich des Temperaturniveaus lassen sich die thermischen Leistungen jeweils in den gleichen Temperaturintervallen zusammenfassen. Die Addition von Wärmekapazitätsströmen führt zu einer kleineren Steigung im betrachteten Temperaturintervall gemäss $1/(CP_1+CP_2) < 1/CP_1$ für positive CP_N . In Kapitel 6.2 wird gezeigt, wie die verschiedenen, in den Anlagen auftretenden thermischen Leistungen gemäss den obigen Überlegungen zu den sogenannten Verbundkurven zusammengesetzt werden.

Die Richtung der Kurve, durch den Pfeil dargestellt (siehe Bild 12 und Bild 13), charakterisiert Aufheiz- und Abkühlvorgänge. Es handelt sich dabei um die einfachsten Fälle von Verbundkurven. Bei der Verdampfung ist Wärme zuzuführen, bei der Kondensation ist Wärme abzuführen. Diese Vorgänge mit Phasenwechsel verlaufen bei reinen Stoffen und azeotropen Gemischen mit konstanter Temperatur. In der Darstellung nach Bild 14 ergeben sich entsprechend horizontale Verläufe der Verbundkurven.

Das T-H-Diagramm oder Pinch-Diagramm eignet sich vorzüglich zur Darstellung der Vorgänge in wärmetechnischen Anlagen.

Das T-H-Diagramm eignet sich besser zur Darstellung von Vorgängen in energietechnischen Systemen mit WRG als das Sankey-Diagramm, da das T-H-Diagramm zusätzlich Temperatur-Information enthält. Sankey-Diagramm und T-H-Diagramm stehen aber naturgemäss in enger Beziehung zueinander.

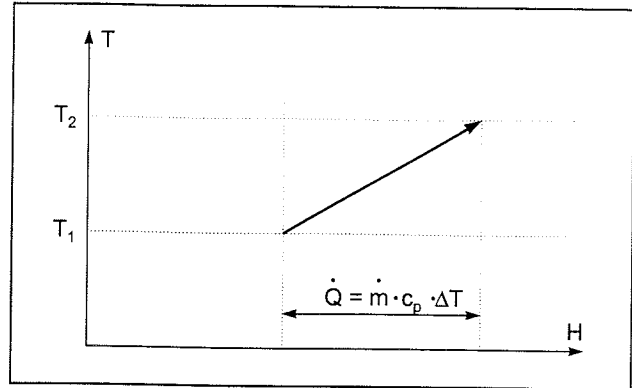


Bild 12: Aufheizvorgang im Temperatur-Enthalpiediagramm (T-H). Z.B. Vorwärmung von Wasser für den Brauprozess bei der Bierherstellung

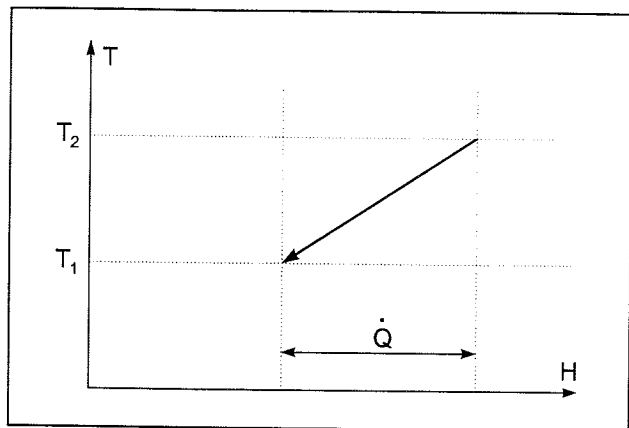


Bild 13: Abkühlvorgang im Temperatur-Enthalpiediagramm (T-H), wie z.B. Abkühlung der Würze (Vorstufe des Jungbieres) nach dem eigentlichen Brauprozess bei der Bierherstellung.

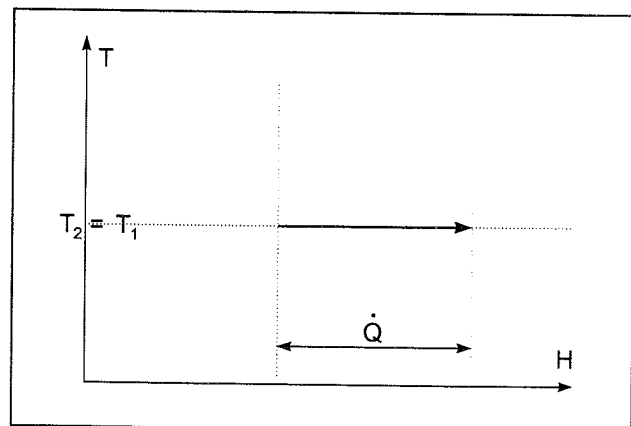


Bild 14: Verdampfungsvorgang im Temperatur-Enthalpiediagramm (T-H), wie z. B. Verdampfung von Wasser aus der Würze (Vorstufe des Jungbieres) während dem Brauen. In diesem Fall findet keine Temperaturänderung statt, da die zugegebene Wärmeenergie zur Phasenumwandlung von Wasser zu Dampf verwendet wird.

4.2 Beispiel

Die vorstehend durchgeführten Überlegungen werden am didaktisch vereinfachten Beispiel der Pasteurisierung von Lebensmitteln (z.B. Milch) verdeutlicht. Beim Pasteurisieren wird das Gut schnell während kurzer Zeit auf hohe Temperatur gebracht und anschliessend rasch gekühlt. Der Prozess kann als Batchprozess oder als kontinuierlicher Prozess ablaufen.

Als Beispiel wird ein kontinuierlicher Prozess gewählt (Bild 15). Dabei wird die mit 15°C angelieferte Milch auf 75°C erhitzt. Bei einem Massendurchfluss von 0.2 kg/s durch den 100 l fassenden Pasteurisationsapparat bleibt sie während der Durchlaufzeit von 500s auf dieser Temperatur. Anschliessend wird sie auf 5°C heruntergekühlt und gelagert.

Der Prozess eignet sich sehr gut für den Einsatz von Wärmerückgewinnung (WRG). Die Modellanlage (Bild 16) arbeitet mit vier Wärmetauschern. Im Eingangswärmetauscher der WRG erfolgt eine Erwärmung von 15°C auf 60°C. Anschliessend wird die Temperatur von 60°C auf 75°C im Erhitzerwärmetauscher angehoben. Im Ausgangswärmetauscher der WRG erfolgt eine Abkühlung von 75°C auf 30°C. Mit dem Kühlerwärmetauscher wird von 30°C auf die Lager-temperatur von 5°C heruntergekühlt.

Die Vorgänge können anschaulich im Energieflussdiagramm, auch Sankey-Diagramm genannt, (Bild 17) dargestellt werden. Die Systemgrenzen umschliessen die vier Wärmetauscher und den Pasteurkessel. Es handelt sich um ein offenes System. Die Energiebilanz bezieht sich auf 1200 Vollbetriebsstunden. Die Komponenten werden als adiabat angenommen. Die WRG liefert 45 MWh der benötigten 60 MWh, mit Heizen müssen bezogen auf eine Eintrittstemperatur von 15°C also noch 15 MWh aufgebracht werden. Durch Kühlen auf 5°C müssen dem Lebensmittel 25 MWh entzogen werden. Augenfälligstes Resultat ist der hohe Nutzen der WRG.

Das Energieflussdiagramm stellt eine aktuelle Situation in Form der betrachteten Energieflüsse integral dar; so sind die Verhältnisse der Energieflüsse zueinander sofort ersichtlich. Nachteilig ist, dass die direkten Temperaturangaben, die zur Abschätzung der Auswirkung von Massnahmen an Anlagen wichtig sind, fehlen.

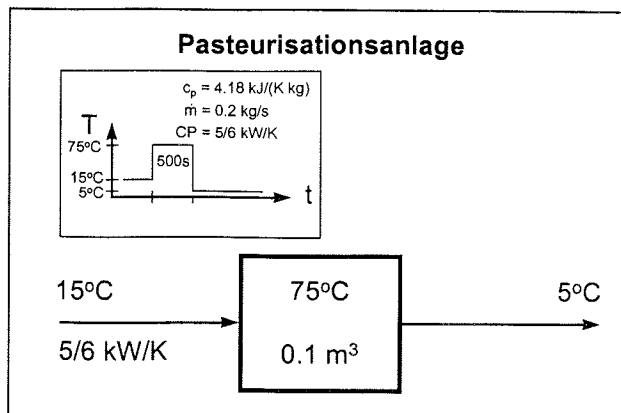


Bild 15: Basisdaten der Pasteurisationsanlage

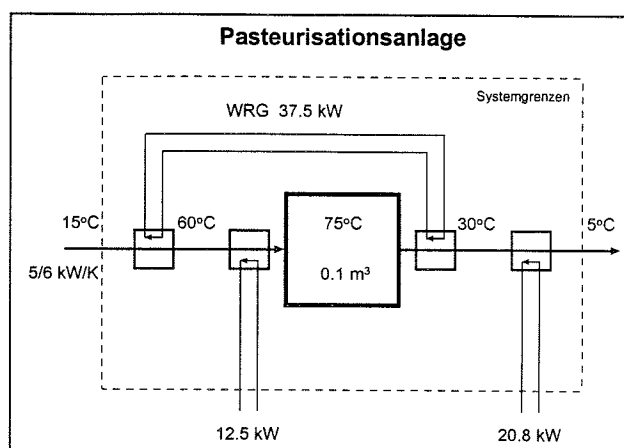


Bild 16: Modell der Pasteurisationsanlage

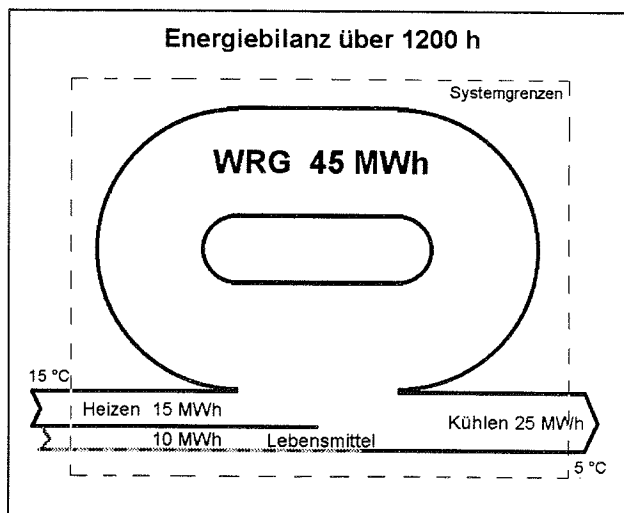


Bild 17: Energieflussdiagramm der Pasteurisationsanlage gemäss Bild 16.

Aussagekräftiger ist die Darstellung der Vorgänge im T-H-Diagramm. Als Kühlvorgang liegt die Abkühlung der Milch von 75°C auf 5°C (Kurve a in Bild 18) vor. Der Wärmekapazitätsstrom beträgt 5/6 kW/K entsprechend einem wärmeabgebenden Strom von total 58.3 kW. Die Wärmeaufnahme wird durch die Kurve b dargestellt, sie ergibt sich durch das Aufheizen von 15°C auf 75°C, beim gleichen Wärmekapazitätsstrom von 5/6 kW/K beträgt die Leistung 50 kW.

Die Kurven a und b sind parallel, da sie die gleichen Wärmekapazitätsströme darstellen. Der Abstand der Kurven in Richtung der T-Achse beträgt 15 K. Diese Temperatur teilt sich auf die beiden identischen Wärmetauscher der WRG auf. Die Projektion der Überschneidung der Kurven a und b auf die H-Achse beträgt 37.5 kW. Diese Leistung wird durch die WRG übertragen.

Zur Konstruktion der Kurven a und b genügen die Temperatur- und Wärmekapazitätsstrom-Angaben gemäss Bild 15. Dabei können Erhitzer, Kühler und WRG weggedacht werden. Die Lage der Kurven a und b zueinander wird durch die Leistungsfähigkeit der WRG bestimmt und Gegenstand von Optimierungsüberlegungen.

Eine Verschiebung der Kurve b nach rechts führt zu einer Verkleinerung der Überschneidung der beiden Kurven, was gleichbedeutend mit einer grösseren Temperaturdifferenz über den Wärmetauschern und einem kleinerem Wärmerückgewinn ist. Im Extremfall der Kurve c findet keine WRG mehr statt. Eine Linksverschiebung der Kurve b erhöht entsprechend den WRG-Anteil.

Wird anstelle der beiden WRG-Wärmetauscher nur noch einer eingesetzt, so verkleinert sich die Temperaturdifferenz über dem verbleibenden Wärmetauscher auf etwas mehr als den halben Wert mit entsprechend mehr WRG-Anteil. Im Extremfall einer unendlich grosser Wärmetauscherfläche liegen die Kurven a und b übereinander. Bei der betriebswarmen Anlage müsste dann nur noch gekühlt werden. Bei der Berücksichtigung wirtschaftlicher Kriterien mit entsprechenden Kostenfunktionen lässt sich eine optimale Wärmetauscherfläche bestimmen (Siehe dazu Kapitel 6).

Der Einfluss der WRG sticht sowohl bei der Darstellung als Energiefluss- wie auch beim T-H-Diagramm ins Auge. Optimierungsüberlegungen sind mit dem T-H-Diagramm transparenter durchführbar.

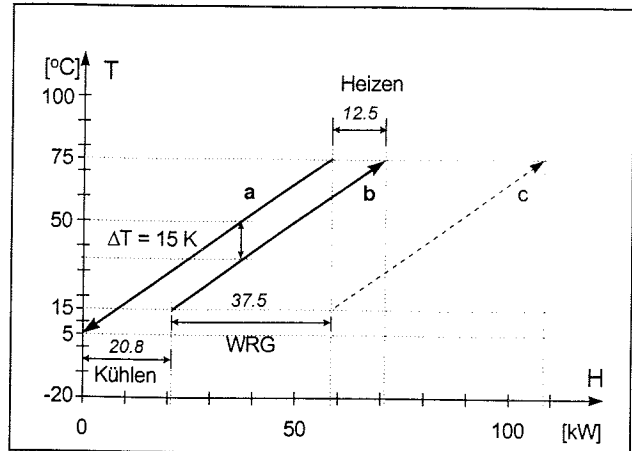


Bild 18: T-H-Diagramm der Pasteurisationsanlage gemäss Bild 16.

5. Modellierung und Definition der Prozessanforderungen

5.1 Vorbemerkung

Der Schritt „Modellierung und Definition der Prozessanforderungen“ verursacht beim Anwender die meisten Schwierigkeiten, da eine gewisse Abstraktion von der bestehenden Anlage erforderlich ist. Gleichzeitig entscheidet sich in diesem Schritt, ob man „die optimale Anlage“ erreichen kann, denn falls das Modell falsch aufgestellt wurde, entsprechen auch die Zielwerte (siehe Kapitel 6) nicht den Tatsachen und man weiss während des Designs (siehe Kapitel 7) nicht, wo man sich mit seiner Lösung verglichen mit der optimalen Lösung befindet. Es ist also wichtig, dass man auch das „richtige“ Problem löst!

5.2 Datenextraktion

Bei der Datenextraktion einer bestehenden Anlage dürfen die bestehenden Prozessdaten wie Temperaturen, Massenströme etc. nicht einfach weiterverwendet werden, sondern jede dieser Größen muss kritisch hinterfragt werden, ob sie

1. für den Produktionsprozess wirklich nötig ist und ob
2. der Wert den tatsächlichen Anforderung des Produktionsprozesses entspricht.

Beispiele für 2. sind:

- in der Haustechnik die Temperatur eines klimatisierten Raumes der im Hochsommer auf 22°C gekühlt wird, obwohl aus Gründen der Behaglichkeit 25°C sinnvoller wäre
- in der Lebensmittelindustrie eine Flaschenreinigungsmaschine, die heute noch mit 500 ml Wasser für die Reinigung einer Glasflasche betrieben wird, die unterdessen aber auf PET-Flaschen umgestellt wurde, welche nur 300 ml Wasser pro Flasche benötigt.

Solche Beispiele werden in der Praxis oft angetroffen.

Im Schritt „Modellierung und Definition der Prozessanforderungen“ entfernt man sich vorerst von der **bestehenden Anlage** und konzentriert sich nur auf die, für den Produktionsprozess notwendigen Daten, die sogenannten **Prozessanforderungen**.

Bei der Planung von **Neuanlagen** sind die Prozessanforderungen bekannt, sobald das Ver-

fahren resp. bei Haustechnikanlagen die Basisauslegung besteht. Diese Auslegungswerte können dann für die Pinch-Methode verwendet werden.

5.3 Beispiel Datenextraktion

Für das Basisbeispiel wird eine Anlage zur Herstellung von Spezialchemikalien aus der industriellen Praxis verwendet und zu Übungszwecken vereinfacht (Bild 19). Bezüglich der Funktionsbeschreibung sei auf Kasten 2 verwiesen. Anhand dieses Basisbeispiels wird im folgenden vordemonstriert, wie eine einfache Datenextraktion abläuft.

Vorgehen:

Im bestehenden Schema (Bild 19) werden die Wärmetauscher (W1 und W2) sowie die Erhitzer (E1 und E2) und der Kühler (Kü1) entfernt. Das Schema (Bild 20) besteht nur noch aus den Prozesseinheiten R1 und R2 sowie aus der Trennkolonnen K1.

Die verbliebenen Größen wie Temperaturen, Massenströme [kg/s] und Wärmekapazitätswerte [kW/K] von 5 Energieströmen werden nun der Reihe nach bezüglich der Prozessdaten hinterfragt. Z.B. für Energiestrom K1 (aufzuheizend), der im Ist-Zustand eine Erwärmung von 30°C auf 120°C in den Mischer R1 mit einer Aufheizleistung von 162 kW_{th} (1.8 x 90 K) erfährt. Hier sollte die Frage gestellt werden, ob 120°C als Mischereintrittstemperatur wirklich nötig sind und ob nicht z.B. 110°C genügen würde, um die gleiche Funktion zu erfüllen.

Analog wird bei den anderen Energieströmen vorgefahren. Dieses Vorgehen braucht einerseits viel Erfahrung seitens des Anwenders der Pinch-Methode sowie meistens die Mithilfe der Prozessspezialisten.

Die Datenextraktion liefert die minimalen Prozessanforderungen, die in Tabellenform (Tabelle 21) zusammengetragen und im nächsten Schritt, der Zielwertfindung (siehe Kap. 6), weiterverwendet werden.

Die gewonnenen und kritisch durchleuchteten Prozessdaten können verwendet werden, um wie in Kap. 6 gezeigt, die Verbundkurven zu erstellen und damit die Energiezielwerte zu bestimmen.

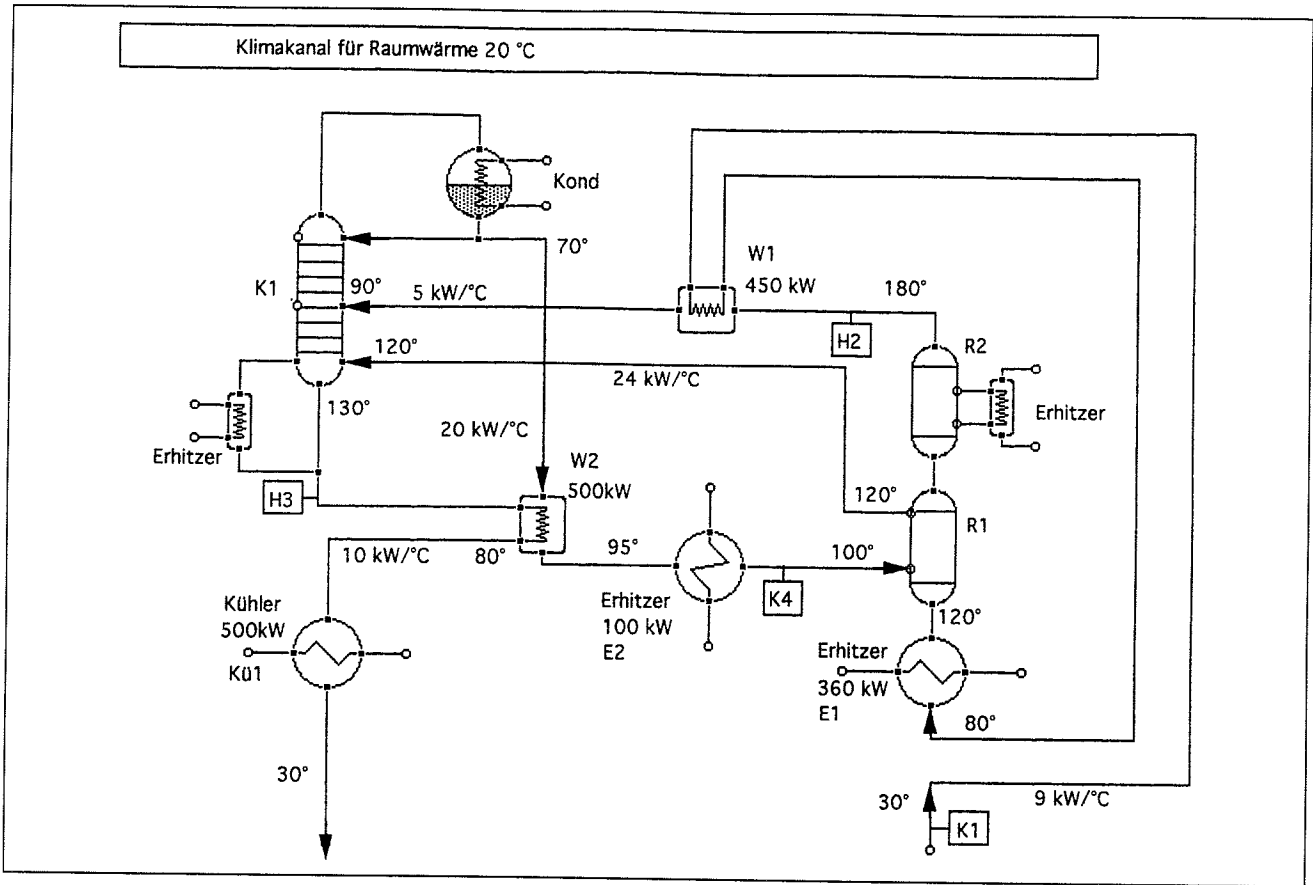


Bild 19: Bestehende Anlage

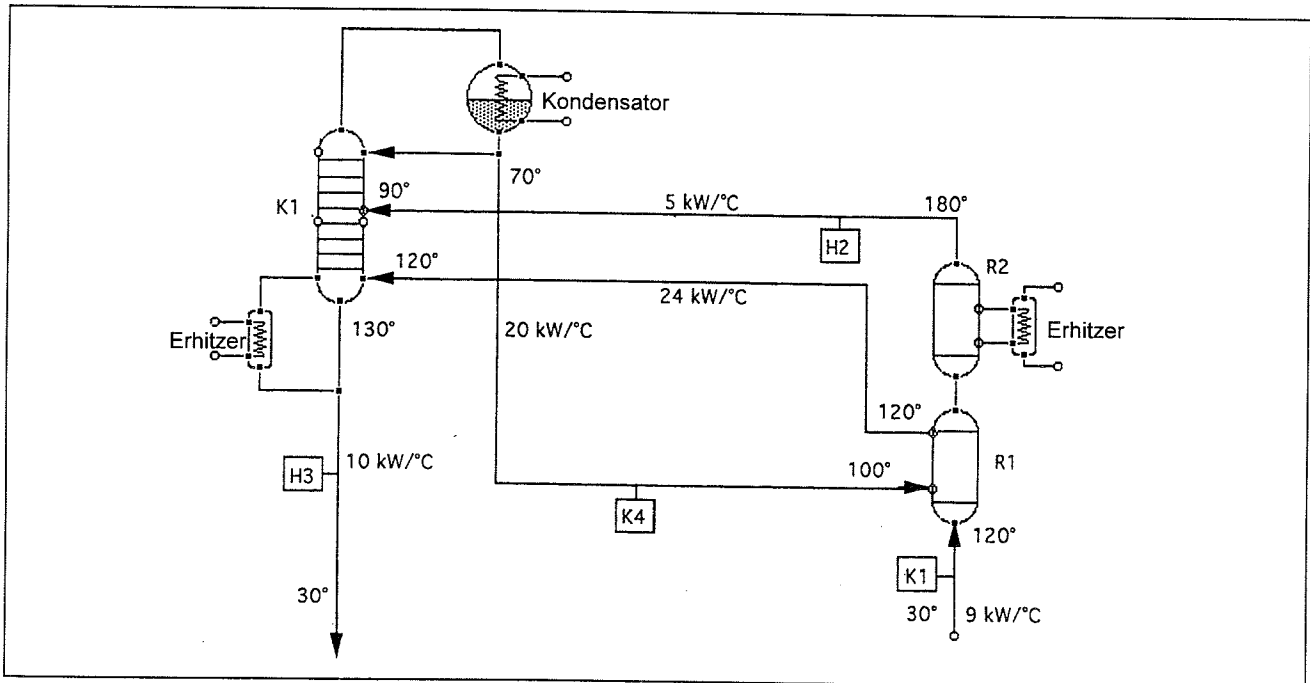


Bild 20: Bestehende Anlage reduziert auf die Grunddaten

&Tanf [°C]	Tend [°C]	m [kg/s]	cp [kJ/(kg K)]	p [bar]	alpha [W/(m ² K)]	Q [kW]	Strom
30	120	9	1	1	300	-810	Cold1
180	90	5	1	1	300	450	Hot2
130	30	10	1	1	300	1000	Hot3
70	100	20	1	1	300	-600	Cold4
200.01	200	util	220000	10	5000		Hot Utility
20	20.01	util		4	2000		Cold Utility

Tabelle 21: Resultierende Prozessanforderungen

5.4 Übung Datenextraktion

Für die in Anhang A Blatt A12 abgebildete Pasteurierungsanlage aus der Lebensmittelindustrie sollen die Prozessdaten erhoben werden und anschließend die Prozessanforderungen bestimmt werden. Die c_p -Werte der zu berechnenden Stoffe betragen $2.7 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$. Die Lösung ist in Anhang A Blatt A13 abgelegt.

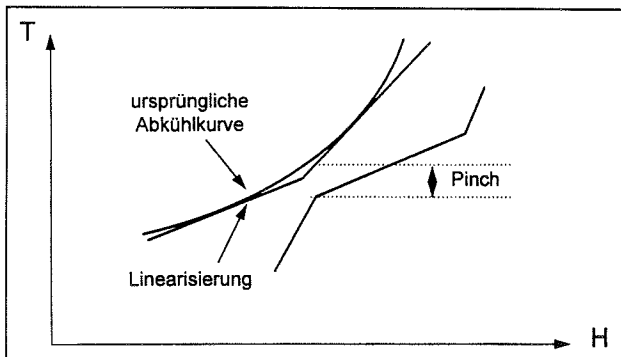


Bild 22: Modellierung der Verbundkurven.

5.5 Prinzipien der Datenextraktion

In diesem Unterkapitel wird das Thema Datenextraktion bei bestehenden Anlagen **und** Projekten von Neuanlagen einen Schritt weiterentwickelt. Als Leitlinien können die folgenden Punkte verwendet werden:

1. Hinterfragung der Prozessdaten, vor allem der Prozesstemperaturen hinsichtlich der Prozessanforderungen
2. Keine Energieströme verschiedener Temperaturniveaus mischen - **Keep Hot Streams Hot and Cold Streams Cold (Aufrechterhaltung der Temperaturkaskade)**
3. Modellierung von Energieströmen auf die **sichere** Seite, sodass z.B. eine Abkühlkurve so linearisiert wird, dass keine örtlichen Unterschreitungen der minimalen Temperaturdifferenz im Bereich des Pinches auftreten (Bild 22), die ursprüngliche Kurve muss die linearisierte Kurve im mittleren Abschnitt berühren. Der Pinch entspricht der engsten Stelle beider Kurven und wird in Kap. 6.2 eingeführt.
4. Identifizierung von sogenannten „Soft Data“, bei welchen die Prozessbedingungen innerhalb einer gewissen Bandbreite festgelegt werden können. Dies sind üblicherweise Abwärmen, welche z.B. im Fall der feuchten Luft bis 30°C abgekühlt statt wie im Originalzustand auf 50°C abgekühlt werden dürfen.
5. Direktdampfeinspritzung ist eine Prozessanforderung und nicht ein Versorgungsenergiestrom.

Werden diese Regeln eingehalten, kann man davon ausgehen, ein optimales Modell der Anlage aufgebaut zu haben.

6. Zielwertfindung mit Verbund- und Wirtschaftlichkeitskurven

6.1 Vorgehensprinzip

Das folgende grundlegende Vorgehensprinzip gilt nicht nur in der Energieplanung!

Pinch-Philosophie:

„Targets before Design“

bedeutet: Die Energie- und Kostenziele (engl. target = Ziel) sollen vor der Auslegung der Anlage definiert werden. „Targeting“ als Begriff aus dem Englischen lässt sich etwa mit „Ziele setzen“ umschreiben und wird im folgenden mit „Zielwertfindung“ übersetzt.

Entscheidend für den späteren Optimierungserfolg ist die gleichzeitige Verfolgung der Energie- und Kostenziele. Dieser Prozess wird im englischen „Supertargeting“ genannt, also eine Art „übergreifende Optimierung“ resp. „Super-Zielwertfindung“ von mehreren Parametern des Produktionsprozesses.

In den nachstehenden Kapiteln werden die Bausteine des „Supertargeting“ erarbeitet.

Energiezielwertbestimmung (Zielwertfindung), d.h. Festlegung des minimalen Wärme- und Kältebedarf mittels Verbundkurven auch Composite Curves genannt (Kap. 6.2 „Verbundkurven“)

Wirtschaftlichkeitsbestimmung, d.h. Einbringung von Investitions- und Energiepreisparameter sowie Betriebsdaten wie z.B. Betriebsstundenzahl, interne Zinssätze etc. (Kap. 6.3 „Wirtschaftlichkeitskurven“)

6.2 Verbundkurven

Aus dem in Kap. 5 „Modellierung...“ gewonnenen Modell der energetischen Daten erhält man im nächsten Schritt die Verbundkurven (Composite Curves) der Anlage.

Aufbau der Verbundkurven (Composite Curves):

1. Alle in der Modellierung (Kap. 5) erhaltenen Prozessanforderungen werden in das Temperatur-Enthalpie-Diagramm (T-H) eingetragen (Bild 23).
2. Innerhalb der gleichen Temperaturintervalle dürfen die Beträge ΔQ von verschiedenen,

aufzuheizenden Prozessen addiert werden. Die erhaltene, zusammengesetzte Kurve heisst „kalte Verbundkurve (cold composite curve)“ (Bild 23). Der gleiche Vorgang kann auch für die abzukühlenden Prozessanforderungen resp. Teilprozesse durchgeführt werden (warme Verbundkurve). Man erhält so beide Verbundkurven (aufzuheizend und abzukühlend), welche den betrachteten Prozess hinsichtlich Energie vollständig beschreiben (Bild 24).

3. Um eine optimale Wärmerückgewinnung zu erreichen, müssen die erhaltenen Verbundkurven untereinander geschoben werden, damit zu möglichst jedem abzukühlenden Prozessstrom ein aufzuheizender gefunden werden kann. An der engsten Stelle zwischen beiden Kurven ergibt sich eine definierte „minimale Temperaturdifferenz“, auch Pinch-Punkt genannt (pinch engl. für Einschnürung). Die minimale Temperaturdifferenz wird nach ökonomischen Kriterien bestimmt (siehe dazu Kap. 6.3 Wirtschaftlichkeitskurven)

N.B. Die Kurven im T-H Diagramm dürfen parallel verschoben werden, da das Superpositionsprinzip gilt (Grund: Bei Enthalpiewerten sind nur Differenzen wesentlich, siehe auch Kap. 4 Grundlagen).

Aus Bild 24 kann die mögliche Wärmerückgewinnung, die extern zuzuführende Heizleistung sowie die abzuführende Kühlleistung abgelesen werden.

Diese Daten hängen vom ΔT_{\min} ab, der minimalen Temperaturdifferenz zwischen allen 'warmen' und 'kalten' Wärmeströmen der Anlage. Die minimale Temperaturdifferenz ist der Parameter für die Festlegung der Wirtschaftlichkeit der Anlage, d.h. der jährlichen Betriebskosten inkl. Abschreibung (siehe Kap. 6.3).

Pinch-Prinzip:

Der Pinch hat die bemerkenswerte Eigenschaft, das untersuchte System in zwei Untersysteme zu teilen (siehe Bild 25):

Das Untersystem oberhalb des Pinchs weist ein Wärmemanko auf und stellt somit eine Wärmesenke dar.

Das Untersystem unterhalb des Pinchs hat einen Wärmeüberschuss und stellt daher eine Wärmequelle dar.

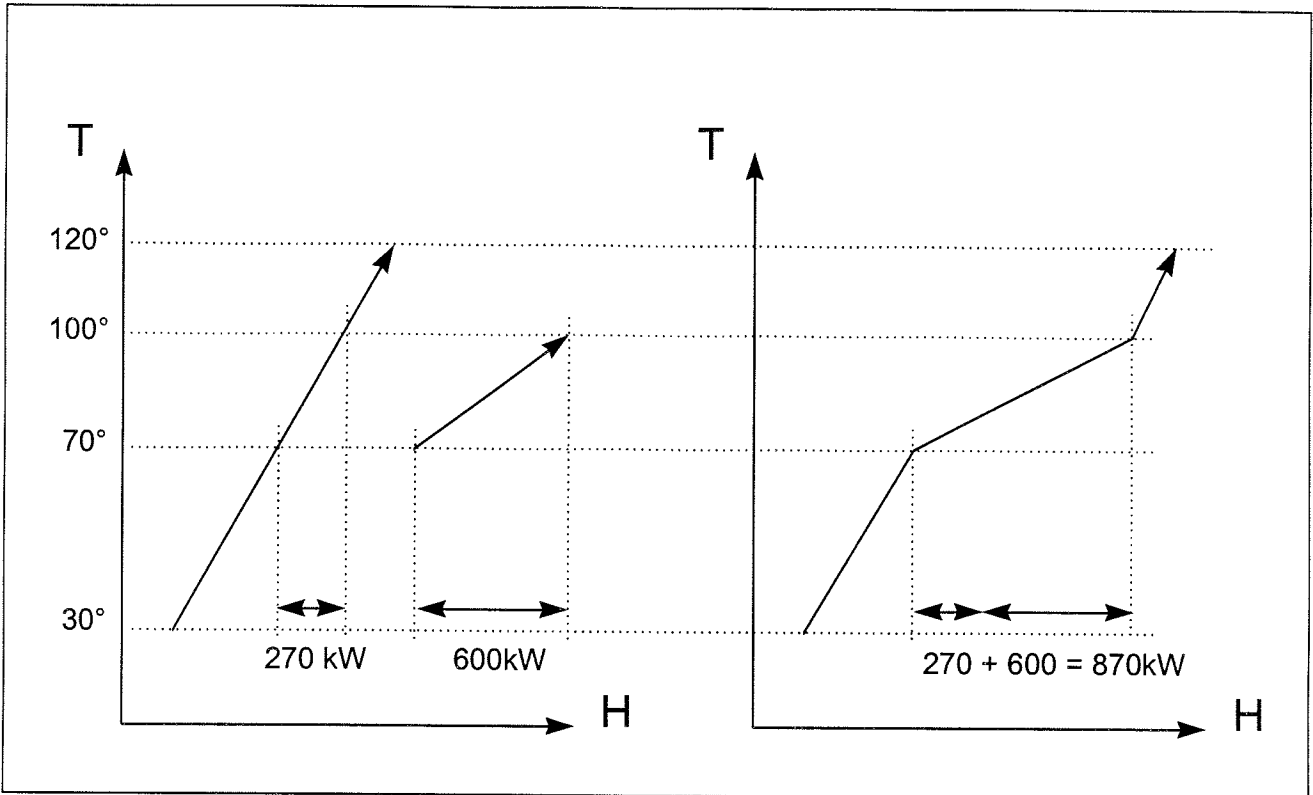


Bild 23: Prozessanforderungen einzeln und zusammengesetzt im T-H Diagramm

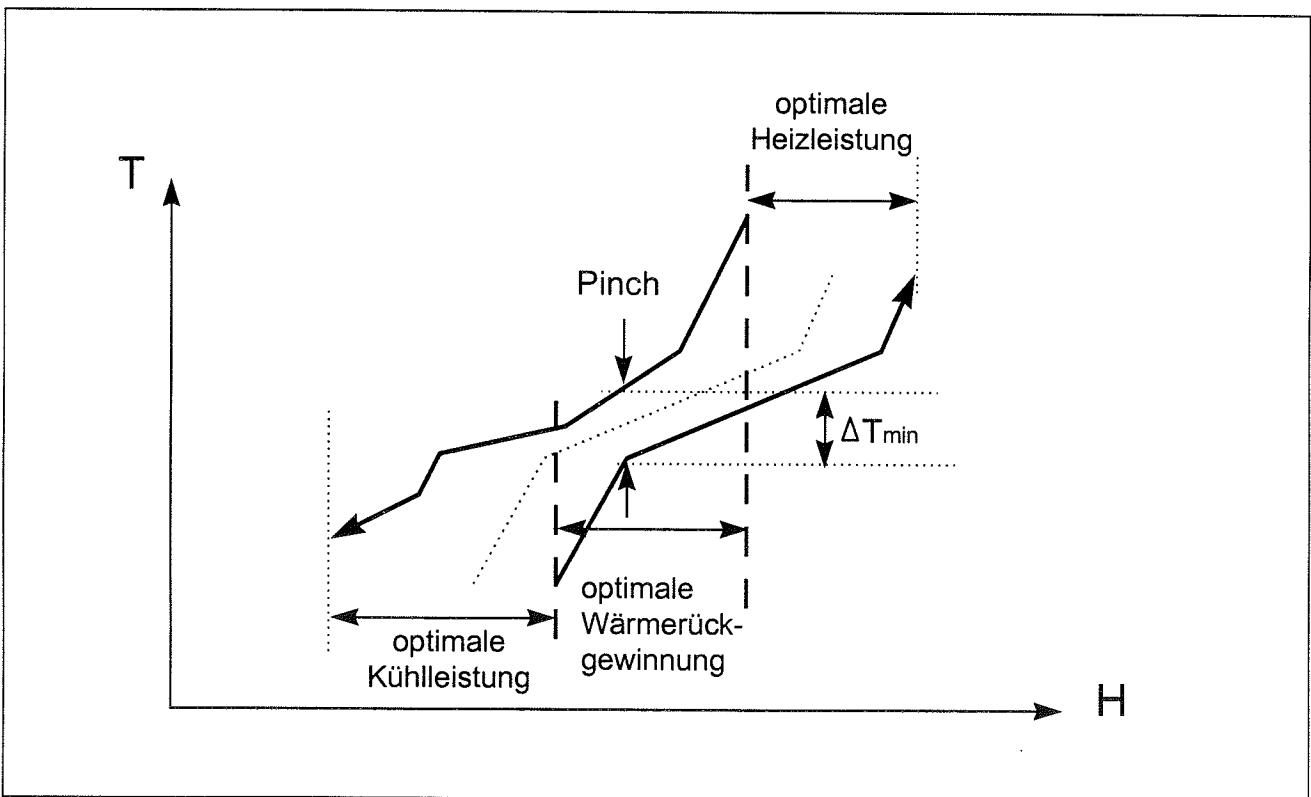


Bild 24: Beide Verbundkurven im T-H Diagramm

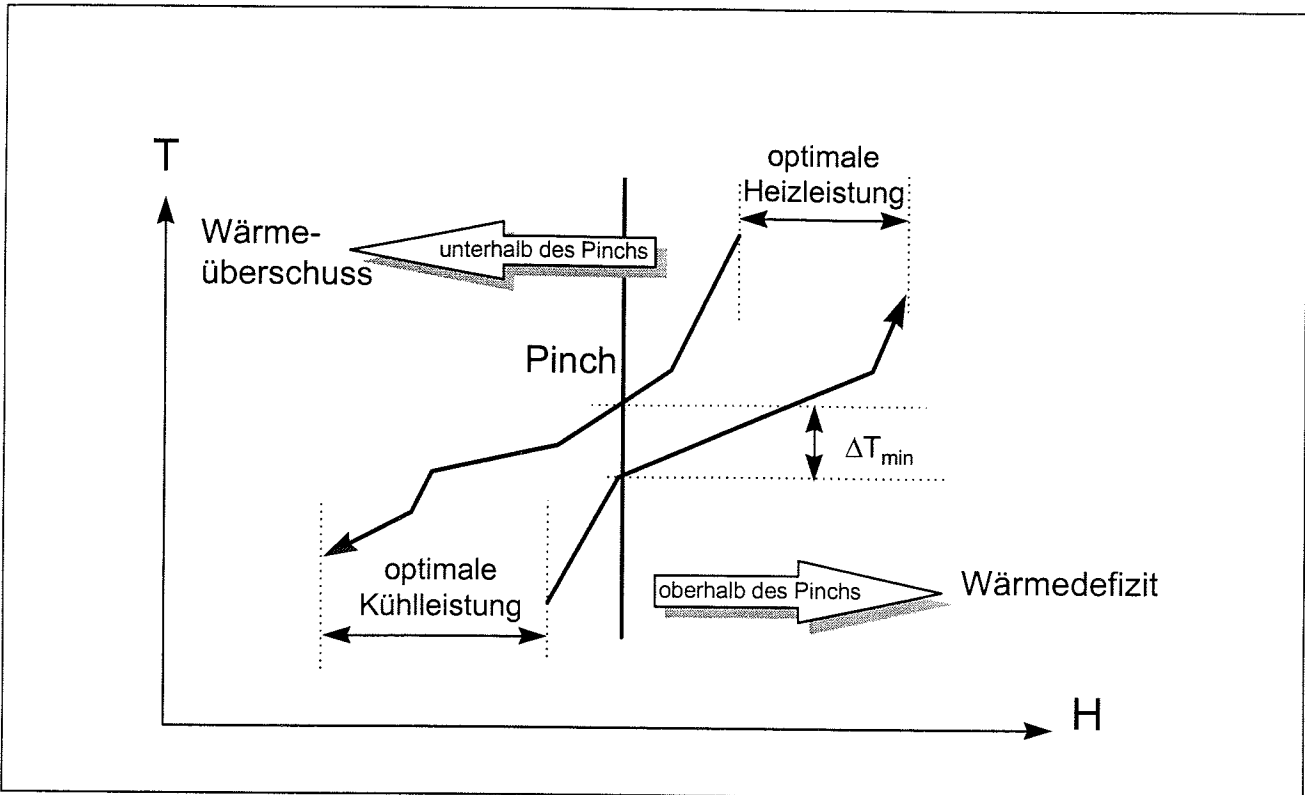


Bild 25: Trennung des Systems durch den Pinch (Pinch-Prinzip)

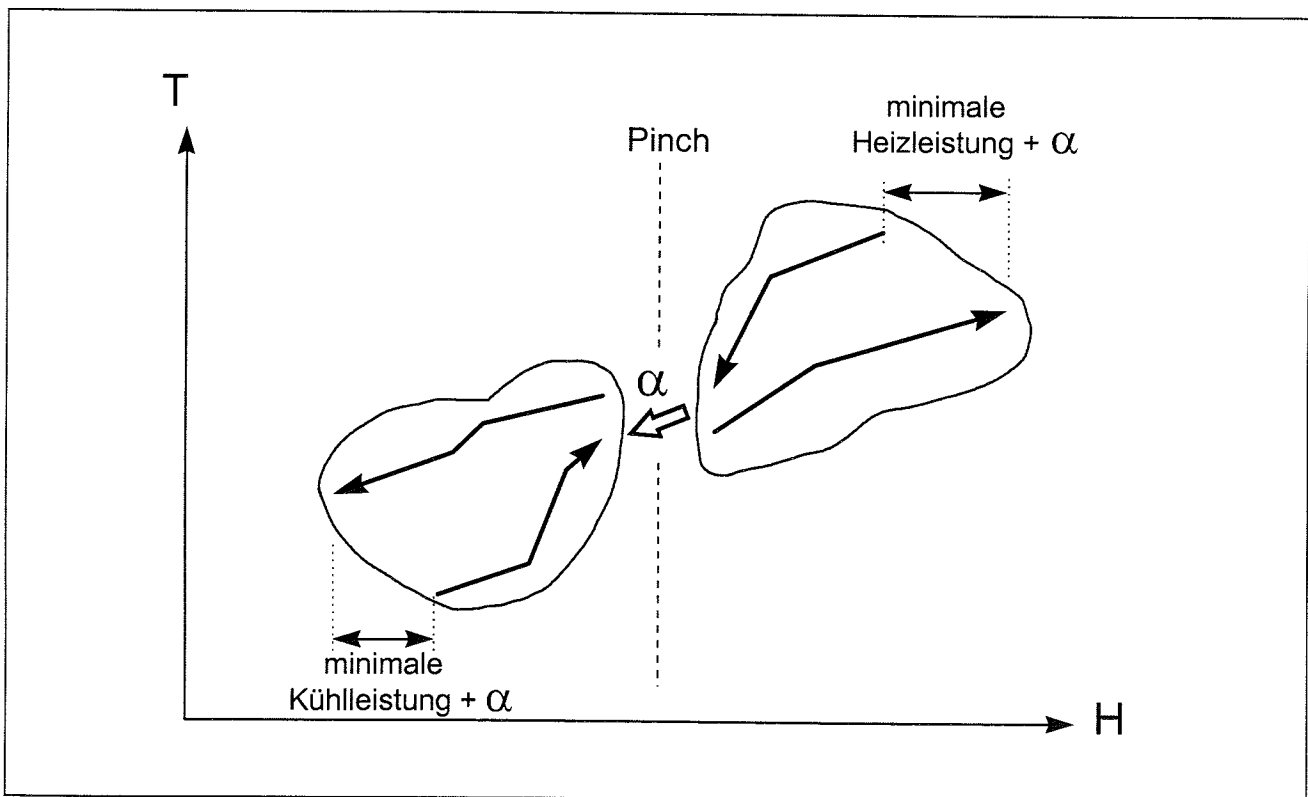


Bild 26: Wärmetransfer durch den Pinch

N.B. Der Bereich mit Energieüberschuss (unterhalb des Pinch) kann bei ausreichendem Temperaturniveau zur Abwärmenutzung ausserhalb der betrachteten Prozesse wie Fernwärme, Raumheizung etc. verwendet werden.

In Bild 26 sind beide Untersysteme energiemässig im Gleichgewicht. Wird nun die Wärmemenge α über den Pinch transportiert, so muss im oberen Untersystem ebenfalls die Wärmemenge α zugeführt werden, um im Gleichgewicht zu bleiben. Analog kann das untere Untersystem betrachtet werden.

Dieser Zusammenhang ist in der Pinch-Gleichung (7) beschrieben.

Pinch-Gleichung:

$$Q_{\text{ist}} = Q_{\text{min}} + \alpha \quad (7)$$

mit α als Wärmetransport durch den Pinch.

Aus den obigen Zusammenhängen können die Pinch-Hauptregeln abgeleitet werden.

Pinch-Hauptregeln:

1. Kein Wärmetransfer durch den Pinch
2. Keine externe Heizung unterhalb des Pinchs
3. Keine externe Kühlung oberhalb des Pinchs

Folgerungen:

- ⇒ Jede überflüssige, extern eingebrachte Wärme muss durch eine externe Kühlung (Strom- oder Wassermehraufwand) wieder abgeführt werden
- ⇒ Keine Wärme-Kraft-Kopplung (WKK), die ihre Abwärme unter dem Pinch liefert
- ⇒ Wärmepumpen müssen Wärme unterhalb des Pinchs verwenden und oberhalb des Pinchs wieder abgeben

Zum besseren Verständnis letzterer 2 Folgerungen empfiehlt es sich das Kapitel 8.3 Utility Placing im Kap. 8 zu lesen.

6.3 Wirtschaftlichkeitskurven

Die Wirtschaftlichkeitskurven setzen sich aus den jährlichen Kapital- und Energiekosten zusammen, welche addiert die jährlichen Gesamtkosten ergeben (siehe auch Bild 27). Diese Kurven werden über der minimalen Temperaturdifferenz des Energiesystems (ΔT_{min}) aufgetragen. Danach wird das optimale ΔT_{min} beim Gesamtkostenminimum gewählt und für die Energiezielwertbestimmung, d.h. Festlegung des minimalen Wärme- und Kältebedarf im T-H-Diagramm verwendet.

Mit zunehmender minimaler Temperaturdifferenz nimmt das für die Wärmeübertragung zwischen heissen und kalten Strömen massgebende treibende Temperaturgefälle zu, es wird folglich weniger Wärmeübertragungsfläche benötigt, d.h. der apparative Aufwand und damit die Investitionskosten nehmen ab.

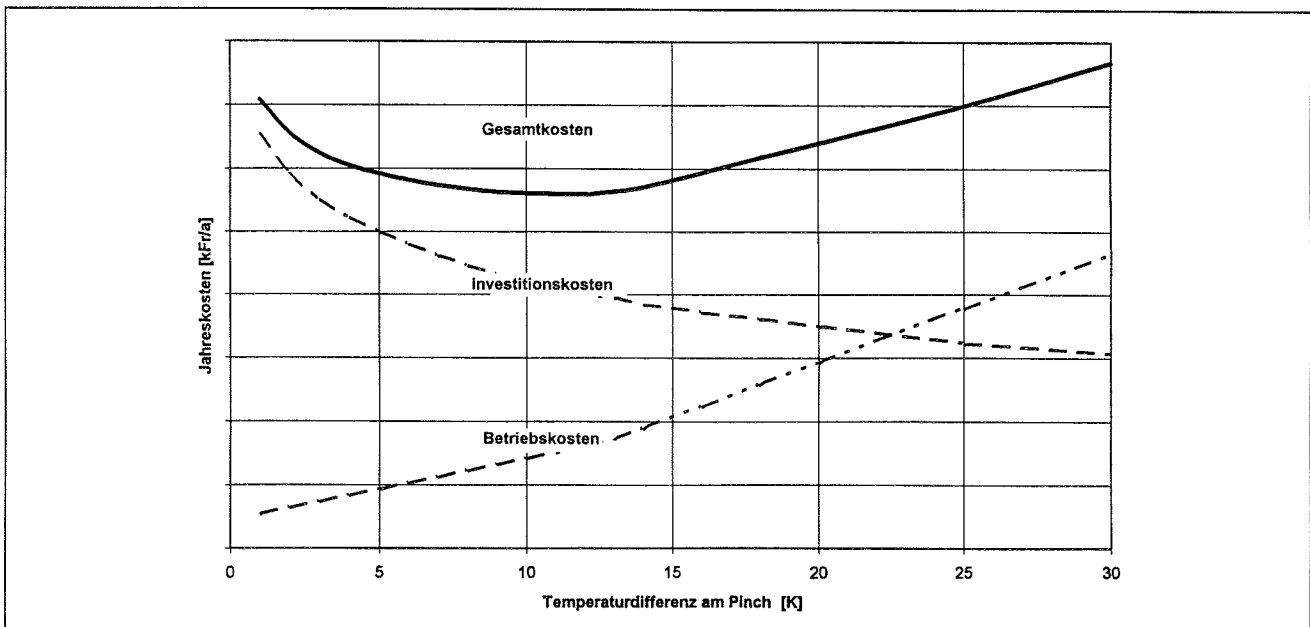


Bild 27: Verlauf der verschiedenen Kosten in Abhängigkeit der minimalen Temperaturdifferenz [3]

Auch die Zahl der für die Wärmerückgewinnung benötigten Wärmeübertrager nimmt ab, da immer mehr Ströme überhaupt nicht mehr genutzt werden können. Dafür steigen die Energiekosten infolge einer geringeren prozessinternen Wärmerückgewinnung: Bild 27. Wir müssen mit anderen Worten die **optimale Pinch-Temperaturdifferenz** für minimale Gesamtkosten finden (*supertargeting*).

Die Pinch-Temperaturdifferenz könnte zwar aus Erfahrungswerten für übliche Wärmeübertragerdimensionierungen grob auf etwa 5-15°C festgelegt werden. Mit grosser Wahrscheinlichkeit wird aber mit dieser Faustregel die optimale Lösung mit minimalen Gesamtkosten verfehlt.

Die Abhängigkeit der Jahresgesamtkosten von der Pinch-Temperaturdifferenz kann nach dem Festlegen folgender Grössen **vor** einer detaillierten Auslegung des Wärmeübertragernetzwerkes berechnet werden (Beispielwerte in Klammer).

Investitionskosten:

Massgebend sind die Wärmeübertragerkosten, die sich gemäss der Kostenfunktion nach Marshall und Swift berechnen:

$$K = Cr \cdot (A/100)^{0.71} \cdot ra \cdot ff \quad (8)$$

K = Kosten für Wärmeübertrager [CHF]

A = Wärmeübertragerfläche [m²]

Cr = Modellfaktor (= 21000 · 1.3) [CHF]

ra = Aktualitätsfaktor (= 906/800) [-]

ff = Faktor Transport und Installation (= 3) [-]

Für die Kapitalkosten wird mit einem Kapitalzins von 6 % und einer Amortisationszeit der Produktionsanlage von 10 a gerechnet.

Betriebskosten:

- Energiekosten inkl. Amortisation (Dampf 0.05 Fr./kWh_{th})
- Kühlwasser (0.04 Fr./kWh_{th})
- Jahresbetriebszeit (4'000 h/a)

Thermodynamische Werte:

- Wärmeübergangskoeffizient: Kondensation von Wasserdampf (8000 W/(m²·K))
- flüssigkeitsseitige erzwungene Konvektion (2000 W/(m²·K))
- gasseitige erzwungene Konvektion (100 W/(m²·K))

Der dazu einzuschlagende Weg ist in [2] Seiten 16 - 50 ausführlich beschrieben.

Die aufwendige Wirtschaftlichkeitsrechnung kann durch das mit namhafter Unterstützung des Bundesamtes für Energie an der ETH-Lausanne entwickelte Programm *PinchLENI* [4] einfach erledigt werden.

6.4 Energetischer Optimierungsgrad

Die folgende Grafik (Bild 28) zeigt die Bedeutung des energetischen Optimierungsgrads.

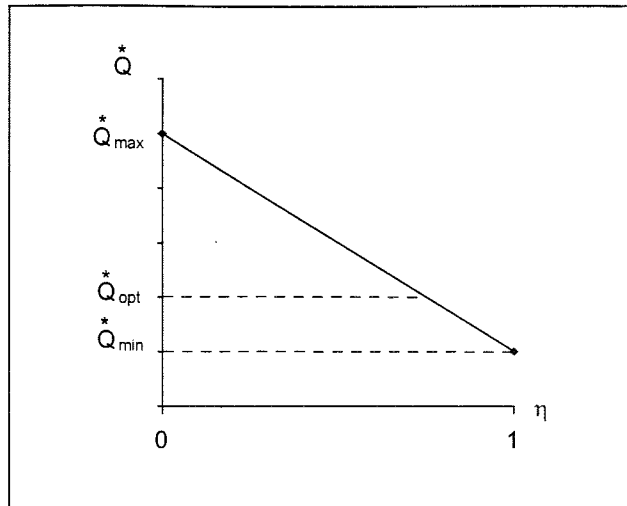


Bild 28: Energetischer Optimierungsgrad

Definition des **energetischen** Optimierungsgrades*:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{max} - \dot{Q}_{ist}}{\dot{Q}_{max} - \dot{Q}_{min}} \quad (9)$$

mit

\dot{Q}_{ist} : heutige thermische Leistung [kW]

\dot{Q}_{max} : thermische Leistung [kW] ohne Optimierung

\dot{Q}_{min} : minimale thermische Leistung [kW] ohne Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit nach der Pinch-Methode, d.h. der thermische Leistungsbedarf bei einem $\Delta T_{min} = 0^\circ\text{C}$

\dot{Q}_{opt} : thermische Leistung technisch-wirtschaftlich optimiert mit der Pinch-Methode [kW]

*energetische Standortbestimmung verglichen mit dem technisch-wirtschaftlich Optimum (absolute energetische Güte)

Der energetische Optimierungsgrad kann auch einzeln für Wärmeenergie oder Kälteenergie definiert werden. Dazu ist einfach der Begriff „thermisch“ durch „Wärme“ resp. „Kälte“ zu ersetzen.

Kommentar:

Der energetische Optimierungsgrad beschreibt eine **absolute energetische Güte** verglichen mit den heute üblichen Zeitreihenmethoden, die z.B. jährliche Vergleiche vornehmen oder Benchmarking, das Branchenkenzahlen mit dem jeweils Branchenbesten vergleicht. Die beiden letzteren Methoden haben den Nachteil, dass sie nur relative Aussagen machen können, d.h. man weiss nie, wie gut die Anlage verglichen mit dem technisch Machbaren ist.

Der energetische Optimierungsgrad eignet sich aufgrund seiner Eigenschaft als absolute Grösse für den Vergleich verschiedener Anlagen mit ähnlichen Prozessen innerhalb der gleichen Branche sowie als Vergleichszahl zwischen den Prozessen verschiedener Branchen. Damit drängt sich diese Grösse als **Bewertungskriterium** z.B. im Rahmen von Umweltmanagementsystemen oder bei Bewilligungsverfahren auf.

6.5 Beispiel Zielwertfindung

Das folgende Beispiel wird anhand des in Kap.5 verwendeten Basisbeispiels durchgeführt.

**Bestimmung der Zielwerte
Wärme- und Kälteleistung:**

1. Alle in der Modellierung erhaltenen Prozessanforderungen siehe Tabelle 21 werden in das Temperatur-Enthalpie-Diagramm (T-H) eingetragen (Bild 29).

2. Die Beträge Q der verschiedenen, aufzuheizenden Ströme, die innerhalb der gleichen Temperaturintervalle (Bild 29) liegen, werden addiert. Man erhält die kalte Verbundkurve (cold composite curve). Der gleiche Vorgang wird auch für die abzukühlenden Prozesse durchgeführt, um die warme Verbundkurve (abzukühlende Prozesse) zu erhalten.
3. Die zwei erhaltenen Verbundkurven (Bild 30) werden untereinander geschoben gemäss der in diesem Fall mittels ökonomischer Kriterien errechneten minimalen Temperaturdifferenz von 10°C im Pinch-Punkt.
4. Die Berechnung dieser minimalen Temperaturdifferenz erfolgt mittels den Wirtschaftlichkeitskurven unter Anwendung der folgenden Parameter (Beispielwerte!): Wärmeübertragerkosten mit $K = 3536 \cdot A^{0.71}$ in CHF, Zins 6 %, Amortisation 5 Jahre, Wärmepreis 0.05 Fr./kWh, Kühlpreis 0.04 Fr./kWh, Betriebsstunden 4'000 h/a, $\alpha = 300 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.
5. Mit der obigen minimalen Temperaturdifferenz von 10°C ergeben sich bei entsprechender Positionierung der Verbundkurven (Bild 30) die folgenden Zielwerte: Wärmeleistung 100 kW_{th}, Kälteleistung 140 kW_{th} sowie eine Pinch-Temperatur von 75°C.

Das obige Vorgehen der Verbundkurvenberechnung, das bei mehreren Energieströmen aufwendig wird, kann durch das Computerprogramm *PinchLENI* [4] der ETH Lausanne erledigt werden.

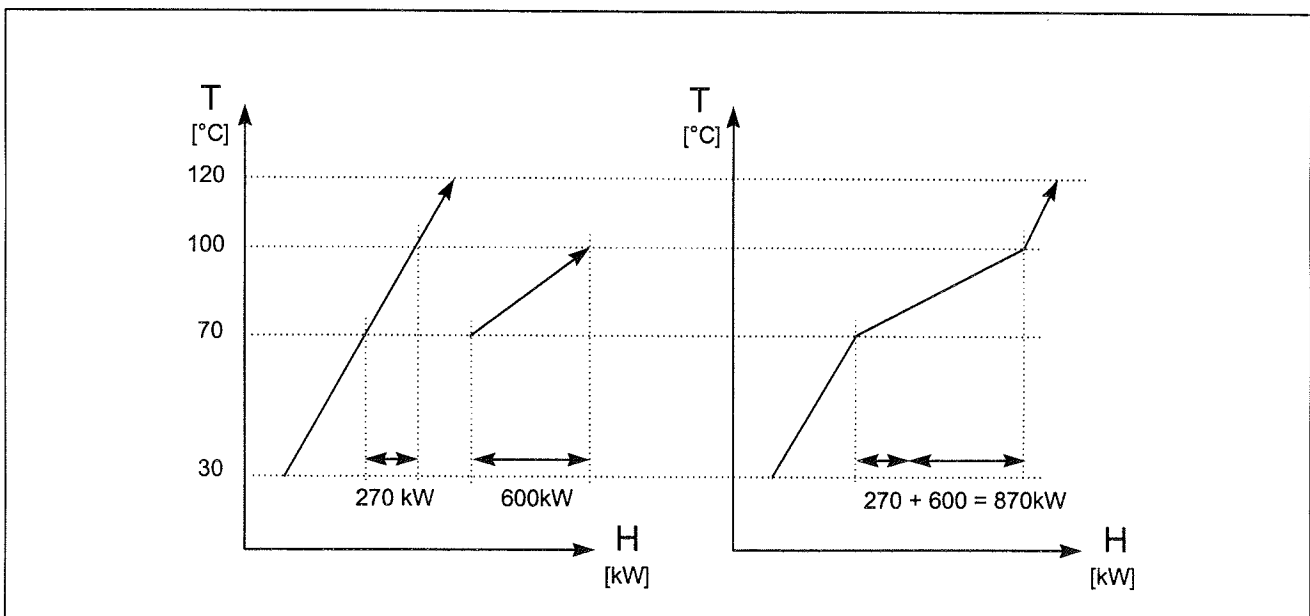


Bild 29: T-H Diagramm mit Prozessanforderungen

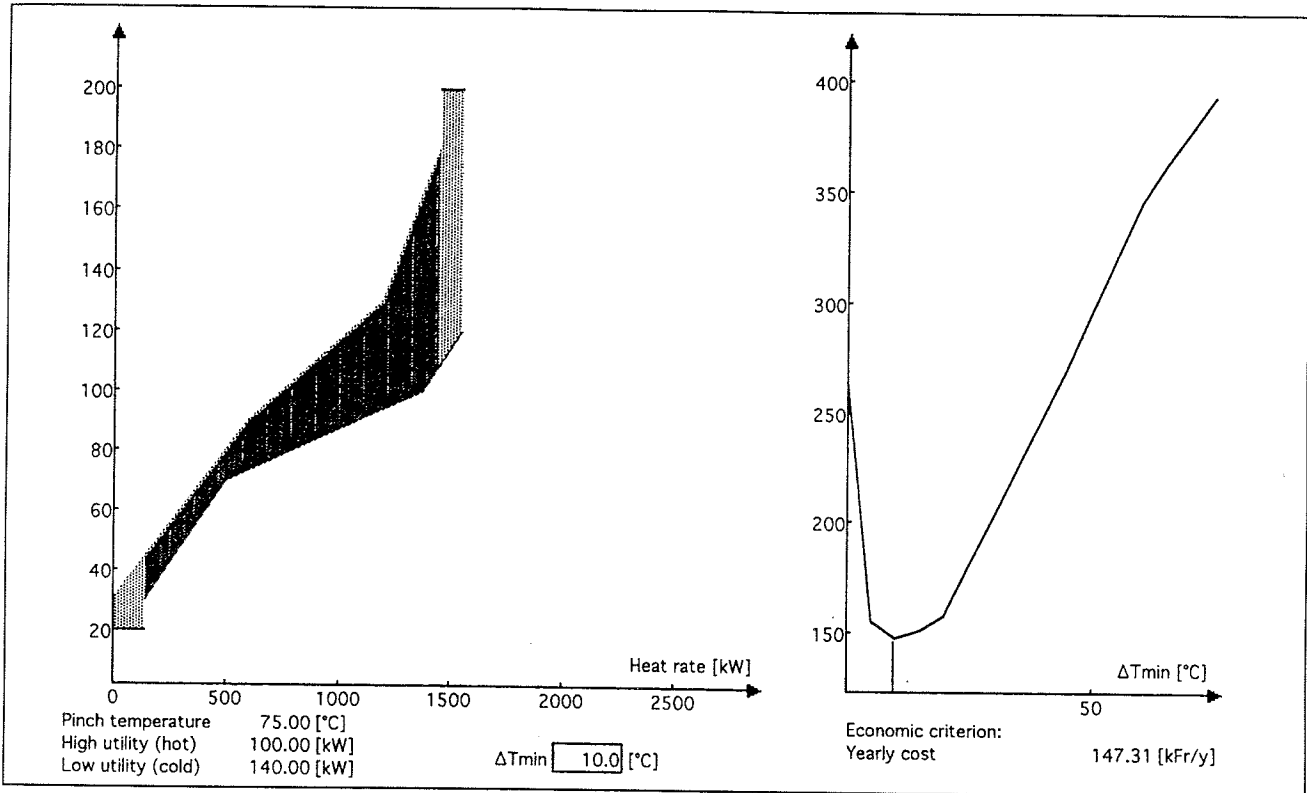


Bild 30: Verbundkurven mit $\Delta T=10$ K, berechnet mit PinchLeni [4]

6.6 Übung Zielwertfindung

Für die bereits extrahierten Prozessanforderungen einer bestehenden Anlage (Tabelle 31) sollen die Verbundkurven für eine minimale Temperaturdifferenz von $\Delta T_{min} = 10$ K erstellt und der minimale Heiz- und Kühlbedarf bestimmt werden. Übungs- und Lösungsblätter sind im Anhang A Blatt A1 und A2 abgelegt.

Eine weitere analoge Übung ist im Anhang A Blatt A3 - A5 zu finden.

	\dot{m} [kg/s]	c_p [kJ/kgK]	CP [kW/K]	T_A [°C]	T_E [°C]	Q [kW]
Prod A	1.07	4.0	4.286	30	100	- 300
Prod B	5.625	4.0	22.5	100	140	- 900
Prod C	10	1.4	14.0	160	60	1400

Tabelle 31: Aufgabenstellung Zielwertfindung

7. Design

7.1. Vorgehensübersicht

Die theoretischen Vorgaben der Verbundkurven (Zielwerte) inkl. der minimalen Temperaturdifferenz ΔT können mit Hilfe eines Netzwerkes von Wärmetauschern in eine verbesserte Anlage mit optimaler Schaltung der Wärmetauscher umgesetzt werden. Der Vergleich „Vorher-Nachher“ zeigt den Erfolg der vorgenommenen Änderungsmaßnahmen in energetischer und wirtschaftlicher Sicht.

Das Design der Anlage erfolgt nach bestimmten Regeln („Design Rules“), welche zielgerichtet zur optimalen Lösung führen und im besten Fall die im Zielwertfindung vorgegebenen Werte erreicht. Oft können diese optimalen Werte jedoch nicht erreicht werden, da vom Betrieb her Einschränkungen (sogenannte „Constraints“) bestehen, die technischer, sicherheitstechnischer, geographischer, betrieblicher Art etc. sein können (siehe auch Kap. 7.4 „Einschränkungen“).

7.2 Netzwerkdarstellung

Die Netzwerkdarstellung nach *PinchLENI* [4] (siehe Bild 32) bringt durch ihre Übersichtlichkeit und Systematik einige Vorteile wie Arbeiten in der

Temperaturkaskade, „straightforward design“ von der Pinch-Temperatur aus (führt zu einfachen Schaltungen) und CAE-Modul als Ingenieurwerkzeug. Nachteilig ist, dass man sich von traditionellen Anlagendarstellungen (wie z.B. Fließbilder) zugunsten einer Darstellung, welche auf die problemspezifischen Größen Temperatur, Wärmeleistung, Massenströme etc. reduziert ist, lösen muss. Den systemtechnischen Aspekten wird somit etwas physikalische Anschaulichkeit geopfert. Man hat dann eine Art „Energiemodell“ der Anlage.

Die Darstellung zeigt die Energieströme als Pfeile, die mit Temperaturangaben (Rechtecke) versehen sind. Diese Pfeile enthalten Kreise mit Zahlen (sogenannte „Hamburger“), welche die jeweiligen aufzunehmenden resp. abzugebenden Energiemengen im jeweiligen Prozessstrom symbolisieren. Im Designprozess werden jeweils 2 Pfeile verbunden, was ein Wärmeaustauschprozess symbolisiert z.B. ein Wärmetauscher oder ein Drehrohrföfen mit heißen Gasen, der kalte Feststoffe aufheizt. Ziel ist es, alle verfügbaren Energiemengen im Netzwerk mittels Wärmeübertrager auszutauschen, um so eine maximale Wärmerückgewinnung resp. ein minimaler Verbrauch an extern zugeführter Energie zu erreichen.

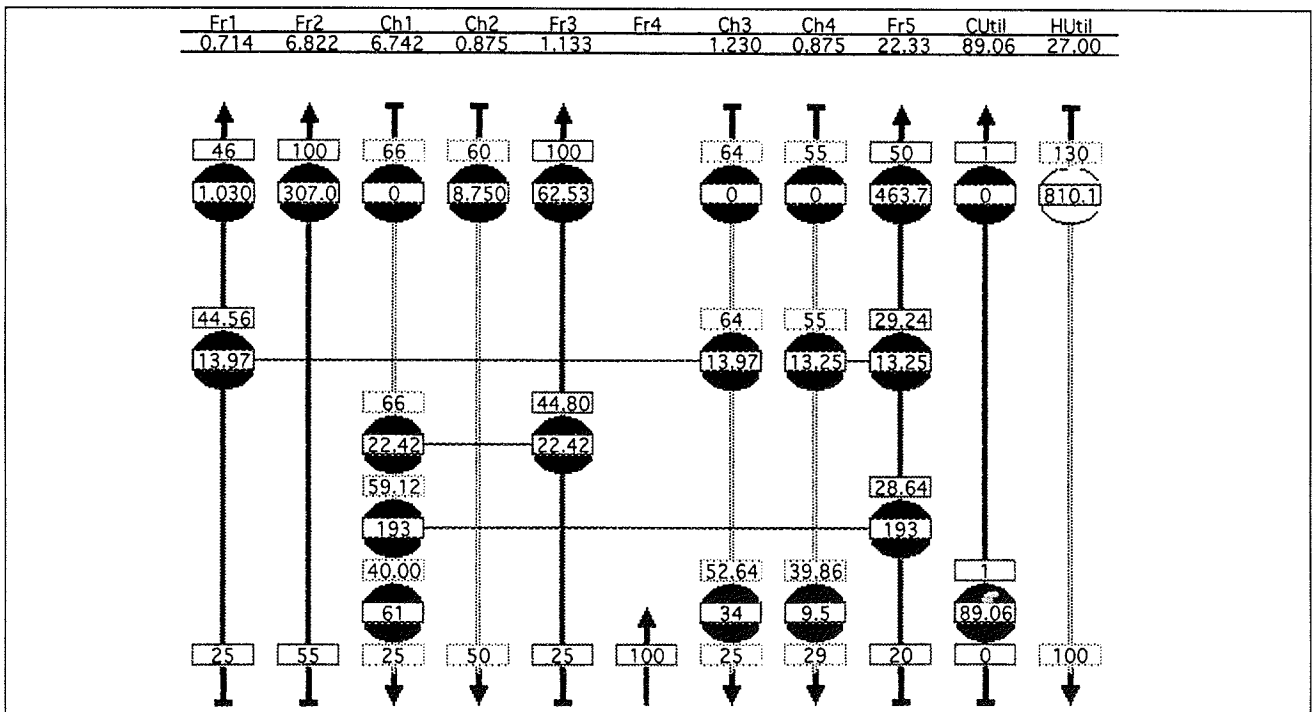


Bild 32: Netzwerkdarstellung

7.3 Netzwerkentwurf

Die primäre Zielsetzung besteht im Entwurf eines optimalen Netzwerkes, das die vorgegebenen Zielsetzungen von Kap. 6 erfüllt, ein sogenanntes MER-Design (Maximum Energy Recovery = Maximale Energierückgewinnung). Diese Energiezielsetzungen können als Orientierungshilfe während des Netzwerkaufbaus verwendet werden.

Auf der anderen Seite ist es sinnvoll zu wissen, welches die minimale Anzahl Wärmeübertrager für das gleiche Netzwerk ist, bei dem auch Wärmerückgewinnung ein wichtiges Gebot ist. Nach Hohmann in [6] gilt folgender Zusammenhang:

$$u_{\min} = N - 1 \quad (10)$$

mit:

u_{\min} : minimale Anzahl Wärmeübertrager inkl. Erhitzer und Kühler

N : Anzahl Energieströme inkl. Heiz- und Kühlströme

Diese Gleichung ist unter den Voraussetzungen einer kleineren Anzahl Wärmeübertragereinheiten und dem Fehlen von Untersystemen im Netzwerk (z.B. ein Teil des Netzwerkes ist unabhängig vom Rest des Netzwerkes und im energetischen Gleichgewicht) gültig, d.h. in den meisten Fällen. In den restlichen Fällen ist die Euler-Gleichung [6] anzuwenden.

Der folgende Zusammenhang zeigt die Bandbreite der möglichen Lösungen:

$$u_{\min} \leq u_{\text{ist}} \leq u_{\text{MER}} \quad (11)$$

mit

u_{\min} : minimale Anzahl Wärmeübertrager inkl. Erhitzer und Kühler

u_{MER} : Anzahl Wärmeübertrager inkl. Erhitzer und Kühler im Netzwerk mit maximaler Wärmerückgewinnung

Das bedeutet, dass ein technisch-wirtschaftlich optimiertes Netzwerk eine Anzahl Wärmeübertrager aufweist, die im obigen Bereich liegt.

Vorgehen beim Netzwerkentwurf:

Als Beispiel wird dabei das Basisbeispiel aus Kap. 6.5 weiterentwickelt.

Schritt 1:

Zum Entwurf eines Netzwerk mit **maximaler Wärmerückgewinnung (MER-Design)** wird das Netzwerk bei der Pinch-Temperatur zweigeteilt, d.h. in ein Untersystem oberhalb sowie unterhalb des Pinch aufgeteilt (siehe Bild 33 und Bild 25). Damit wird die **Pinch-Hauptregel 1** „Kein Wärmetransfer durch den Pinch“ (Kap. 6.2) berücksichtigt. Um rasch zu dem sogenannten MER-Design zu kommen, sollten folgende **Design-Regeln** sowie die **Pinch-Hauptregeln 2 und 3** (Kap. 6.2) berücksichtigt werden (das Nachvollziehen erledigt man am besten mit dem Programm *PinchLENI* [4] am Demobeispiel).

Design-Regeln:

- Bei beiden Untersystemen vom Pinch aus starten.
- Mit dem „grössten“ Energiestrom, der in Richtung des Pinches geht, beginnen (grosser CP).
- Sicherstellen, dass $CP_{\text{out}} > CP_{\text{in}}$ erfüllt ist (die „hinausgehenden“ Energieströme müssen grösser als die „hineingehenden“ sein).
- Die Wärmeübertrager nahe dem Pinch zuerst setzen.
- Die Wärmeübertrager nahe dem Pinch so gross als möglich wählen, ohne dass die vorgegebene minimale Temperaturdifferenz ΔT_{\min} verletzt wird.
- Die restlichen Wärmeübertrager setzen, wobei jeweils ein Energiestrom fertiggestellt wird, bevor der nächste an die Hand genommen wird.

Zusatzregel:

Teilweise ist es nötig „grosse“ Energieströme (d.h. hohe Wärmekapazitäten) in 2 Teilströme aufzusplitten, damit die Regeln c und e eingehalten werden können.

Das mit diesem Vorgehen erhaltene Netzwerk (Bild 34, als Anlagenfliessbild Bild 35) ist zwar energieoptimal, kann aber hinsichtlich Kapitalkosten noch verbessert werden!

Anmerkung:

Beim in den Kapiteln 5-7 bis jetzt verwendeten Basisbeispiel ist der folgende Schritt 2 im „Vorgehen beim Netzwerkentwurf“ nicht nötig resp. lohnt sich nicht, weil man durch „Wärmetauscher streichen“ (siehe Schritt 2B) zuviel Wärmerückgewinnung verlieren würde. Um aber das Vorgehen zeigen zu können, wird ein komplexeres Beispiel verwendet.

Schritt 2:

Das nächste Ziel ist die Reduktion der Anzahl Wärmetauscher des MER-Designs ohne wesentlich höheren Energieverbrauch der Anlage. Dies erfolgt durch **Elimination von Wärmeübertrager bei gesplitteten Teilströmen** und **Elimination von sogenannten „Loops“** (deutsch: Schleifen, Kreisläufe). Die strikte Trennung des Netzwerkes durch den Pinch wird für die folgenden Schritte aufgelöst. Man nimmt einen relativ geringen Mehrverbrauch zu Gunsten weniger Wärmeübertrager in Kauf.

- A. Bei der Elimination von Wärmeübertragern bei gesplitteten Teilströmen wird jeweils der kleinere Wärmeübertrager gestrichen und beide Teilströme zusammengeführt. Der übriggebliebene Wärmetauscher wird so gross, wie unter den gegebenen Umständen möglich gemacht. Um die vorgegebene minimale Temperaturdifferenz ΔT mit diesem Wärmetauscher nicht zu verletzen, muss die externe Kühlleistung des betroffenen abzukühlenden Energiestromes erhöht werden (siehe Bild 36 und Bild 37)
- B. Die sogenannten „Loops“ sind Kreisläufe (Bild 38) im Netzwerk, die über Wärmetauscher und über das Heiz- und/oder das Kühlsystem führen können. Hier wird der Wärmetauscher gestrichen, der einen „Loop“ verursacht und innerhalb dieser Gruppe „loopverursachenden“ Wärmetauscher der kleinste ist. Dieses Vorgehen wird wiederholt, bis man durch „Wärmetauscher streichen“ zuviel Wärmerückgewinnung verliert.

Das Resultat dieses Vorgehens ist ein theoretisches Netzwerk. Um zu einem in der Praxis brauchbaren Netzwerk zu gelangen, müssen noch Einschränkungen sogenannte „Constraints“ im Betrieb berücksichtigt werden.

Constraints können Einfluss auf den Prozess der **Elimination von „Loops“ Schritt 2B)** haben, nämlich auf die Auswahl des Wärmetauschers, welcher den entsprechenden „Loop“ auflösen soll (siehe Kap. 7.4).

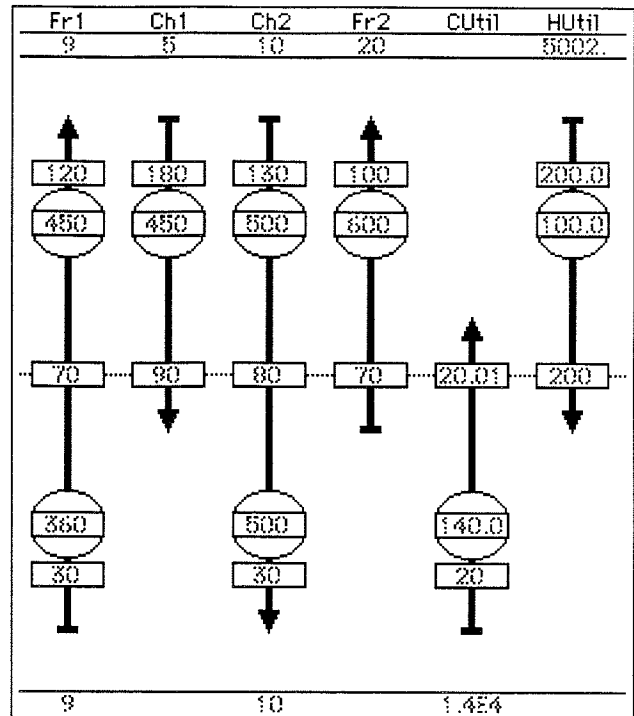


Bild 33: Netzwerk durch Pinch zweigeteilt

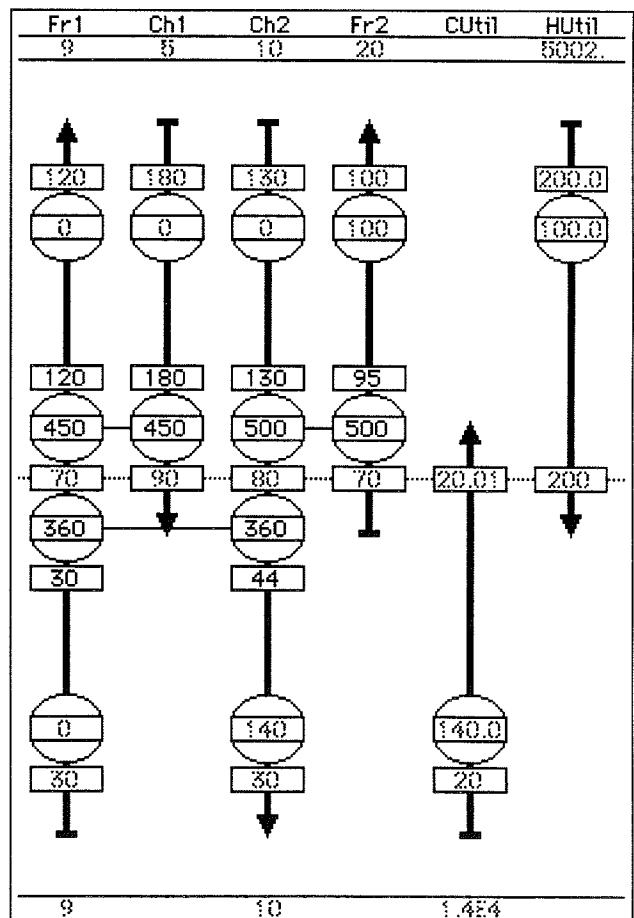


Bild 34: MER-Netzwerk

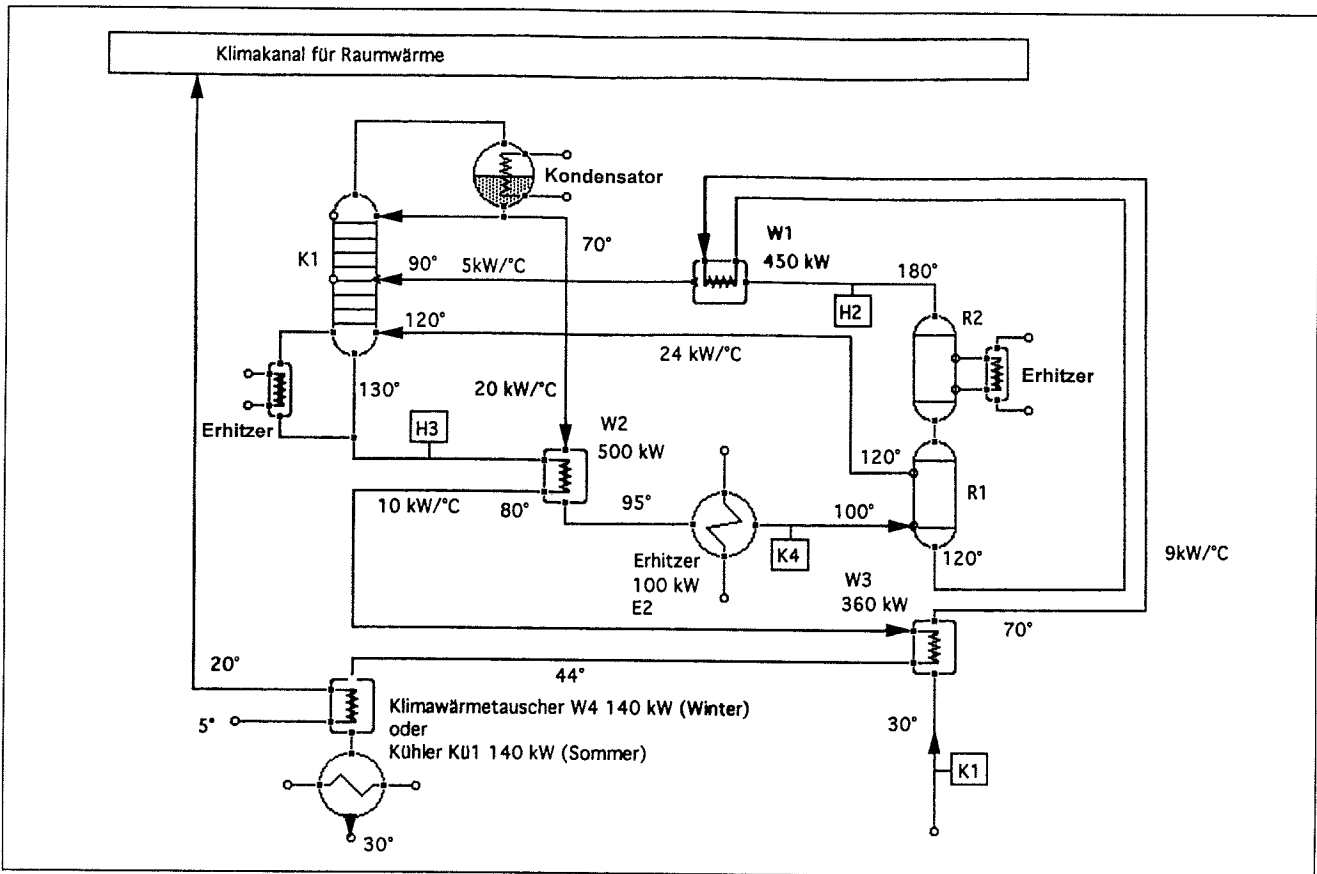


Bild 35: Netzwerk als Anlagenflussbild

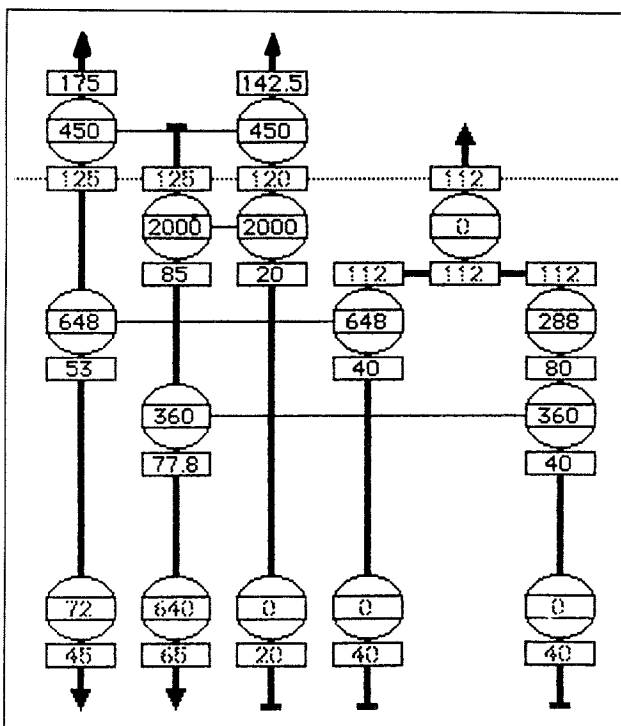


Bild 36: Wärmeübertrager bei gesplitteten Energieströmen

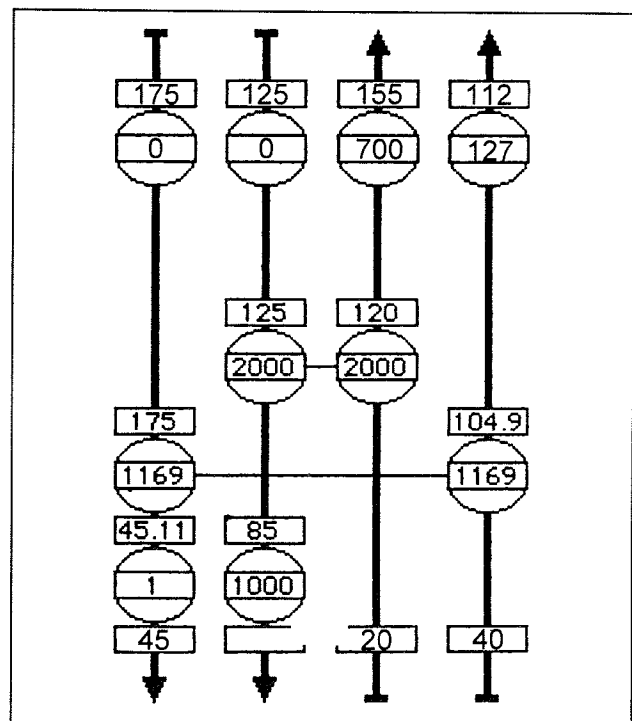


Bild 37: Erhöhung der Kälteleistung bei zusammengeführten Teilströmen

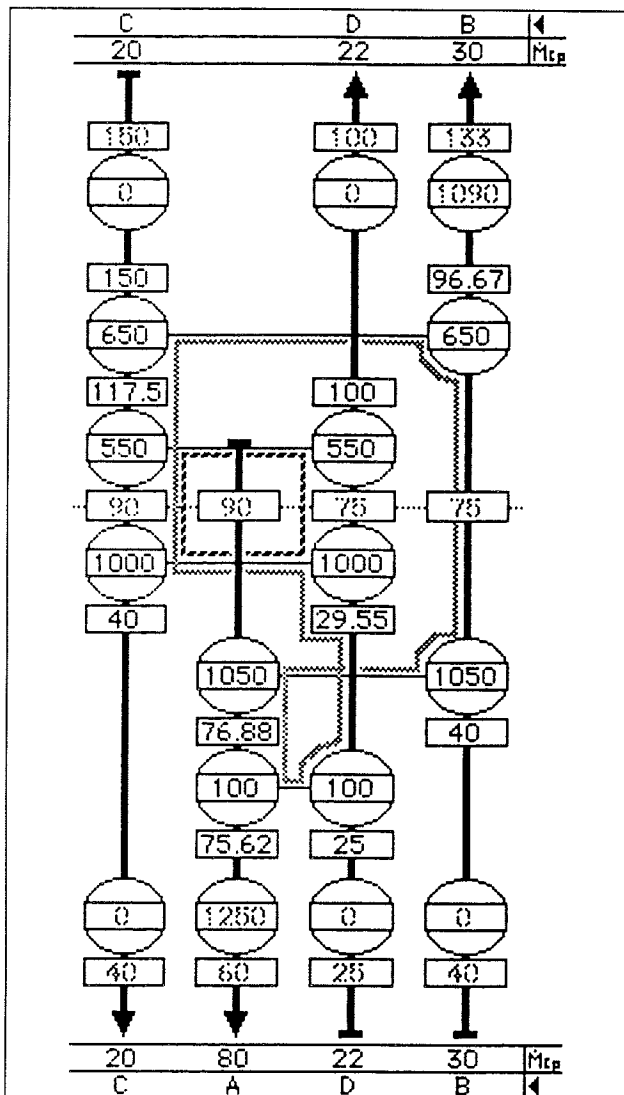


Bild 38: Netzwerk mit „Loops“ [9]

7.4 Einschränkungen

Einschränkungen, sogenannte „Constraints“ für die Kombination von zwei Energieströmen durch Wärmeübertrager können verschiedener Art sein:

geografisch:

Die zu kombinierenden Energieströme (z.B. Produkt) sind weit (> 200 m) voneinander entfernt.

aus Platzgründen:

Eine grosse Feuchtluft-Luft Wärmetauscherbatterie in einer älteren Papierfabrik mit engen Platzverhältnissen.

prozesstechnisch:

Der eine Energiestrom ist ein Produkt (z.B. gekochte Früchte in der Lebensmittelindustrie), das durch einen Wärmetauscher in seiner Konsistenz zerstört würde.

oder:

Eine Änderung eines bestehenden Klinkerkühlers in der Zementindustrie wird aus energetischen Gründen angestrebt, kann aber aus konstruktiven Gründen nicht realisiert werden, weshalb ein Austausch durch einen Kühler einer neueren Generation notwendig wäre. Dies nur aus energetischen Gründen zu realisieren ist aber nicht finanzierbar.

sicherheitstechnisch:

Thermoöl kombiniert mit einer ab 200°C chemisch reagierenden Flüssigkeit.

betriebllich:

Der eine Energiestrom fällt kontinuierlich an, während der zweite nur zu unregelmässigen Zeiten verfügbar ist.

aus Flexibilitätsgründen:

Eine Verkoppelung von 2 Energieströmen in der selben Anlage würde das An- und Abfahren der Anlage erschweren oder der Anlagenführer kann durch die Einschränkung (Verkoppelung zweier Energieströme) nicht mehr alle notwendigen Betriebsfälle fahren.

korrosionstechnisch:

Korrosive Stoffpaarungen im benötigten Wärmeübertrager, für die es schwierig ist, ein gemeinsames korrosionsfestes Wärmetauschermaterial zu finden z.B. Salzsäure und Flußsäure.

Die „Constraints“ können **bedingter oder unbedingter** Art sein:

Bedingt sind sie, wenn sie nur **bedeutende Mehrkosten** verursachen, wobei geprüft werden muss, ob sich der entsprechende Mehraufwand allenfalls doch dank Kombinationseffekten lohnt.

Unbedingt sind sie, wenn sie eine **Gefahr** erzeugen oder **technisch nicht machbar** sind.

Diese Einschränkungen reduzieren die praktisch erreichbare Wärmerückgewinnung und Abwärmennutzung verglichen mit den energetischen Zielwerten.

Bei der Planung von entsprechenden Anlagen ist es für den Ingenieur sehr wichtig, die verschiedenen Arten von Einschränkungen im Hinterkopf zu behalten, um nicht in der Ausführungsphase mit bedeutenden Mehrkosten oder sogar Sicherheitsproblemen konfrontiert zu werden.

7.5 Übung Netzwerkentwurf

Übung 2

Übung 1

Konstruieren Sie das MER-Wärmetauschernetzwerk zur Übung Zielwertfindung in Kap. 6.6, wobei der dort gefundenen minimale Heiz- und Kühlbedarf erreicht werden sollte. Übungs- und Lösungsblätter sind im Anhang A Blätter A1 und A2 abgelegt.

Konstruieren Sie das MER-Wärmetauschernetzwerk sowie das optimale Netzwerk mit den Designregeln aus Kap. 7.3. Die Prozessanforderungen (Tabelle 39) sowie der minimale Heiz- und Kühlbedarf von $366 \text{ kW}_{\text{th}}$ resp. $315 \text{ kW}_{\text{th}}$ sind gegeben. Die Verbundkurve und die Lösungsblätter sind im Anhang A Blätter A6 - A8 abgelegt.

TIn [°C]	TOut [°C]	m [kg/s]	cp [kJ/(kg K)]	Leistung [kW]	Bezeichnung
25	46	0.6833	1.045	-15	K1
55	100	1	6.8222	-307	K2
66	61	0.6833	1.024	3.5	H3a
same	40	0.6833	14.77	212	H3b
same	25	0.6833	5.95	61	H3c
60	50	0.8333	1.05	9	H4
25	100	1.0566	1.072	-85	K5
100	100.01	1	0	0	K6
64	25	1.0566	1.164	48	H7
55	29	0.8333	1.05	23	H8
130	101	util	4		Heisswasser
0	1	util	1		Kühlwasser

Tabelle 39: Tabelle Prozessanforderungen

8. Optimierung der Energieversorgung

8.1 Zielsetzung

Das folgende Kapitel ist der Optimierung der Energieversorgung eines Industriebetriebes, Spital o.ä. Bauten gewidmet. Hauptkriterium ist dabei die Festlegung der Wärme- und Kälteleistungen sowie der günstigsten Temperaturniveaus von Heiz-, Kälteanlagen, Wärmepumpen etc. Aus exergetischen Gründen lässt sich folgendes **Hauptprinzip der Energieversorgung** formulieren:

für Heizenergie:

Verwendung der Heizenergie in den Prozessen auf möglichst tiefem Temperaturniveau hingegen Produktion der Heizenergie auf möglichst hohem Temperaturniveau

für Kühlenergie:

Verwendung der Kühlenergie in den Prozessen auf möglichst hohem Temperaturniveau hingegen Produktion der Kühlenergie auf möglichst tiefem Temperaturniveau

Grund für dieses Prinzip ist der hohe Einfluss der Temperatur der Heizmedien auf die Energiebereitstellungskosten inkl. Amortisation der Heizungsanlage. Mit Hilfe einer optimalen Temperaturkaskade kann Wärme jeweils bestmöglichst einem geeigneten Nutzer zugeführt werden ohne, dass z.B. eine zu hohe Temperatur verwendet wird, die gar nicht nötig wäre und letztlich zu höherem Energiebedarf und damit zu höheren Kosten führt. Der Grund für die üblicherweise zu hohen Wärmeversorgungstemperaturen (z.B. mit Kesseln) liegt in der einfacheren Wärmeverteilung auf verschiedene Wärmebezüger. Sie sind aber thermodynamisch nicht sinnvoll.

Die Zielsetzung ist, für jede Anlage die optimalen Versorgungswärme- und Kälteleistung, sowie Versorgungstemperaturen zu finden. Im Spezialfall gilt dies auch für die Wärmepumpe, deren optimale Wärmereservoir- bzw. Wärmeabgabetemperatur zu bestimmen sind. Eine Hilfestellung für diese Aufgabe geben die sogenannten „Gesamtverbundkurven“ (grand composite curves).

8.2 Gesamtverbundkurven

Die Gesamtverbundkurven werden aus den gleichen Basisdaten wie die Verbundkurven (vgl. dazu Kap.6), nämlich den Prozessanforderungen,

gewonnen. Die alternative Darstellungsform der Gesamtverbundkurven ist auf die oben (Kap. 8.1) erwähnten Erfordernisse zugeschnitten. Auch bei dieser Kurve muss die minimale Temperaturdifferenz ΔT_{\min} , die mit den Wirtschaftlichkeitskurven (Kap. 6.3) berechnet wurde, eingehalten werden.

Aufbau der Gesamtverbundkurve:

1. Die bestehenden Verbundkurven (Composite Curves) werden einander um je $\Delta T_{\min}/2$ vertikal angenähert bis sie sich im Pinch-Punkt berühren (siehe Bild 40). Die angenäherten Kurven weisen im Pinch-Punkt den horizontalen Abstand null, am oberen und unteren Ende der Temperaturkaskade den Abstand entsprechend dem minimalen Heiz- und Kühlenergiebedarf auf.
2. Die horizontalen Abstände in der Art D'-D werden nun ebenfalls in ein Temperatur-Enthalpie Diagramm eingetragen (Bild 41), wobei jeweils von der y-Achse her in positiver x-Richtung abgetragen wird. Die resultierende Kurve ist die sogenannte „Gesamtverbundkurve“ (Grand Composite Curve) mit der man neben dem Pinch-Punkt (horizontaler Abstand = 0), minimalem Heiz- und Kühlbedarf auch das optimale Temperaturniveau der Heiz- und Kühlenergie bestimmen kann.

N.B. 1. Durch die Annäherung der Gesamtverbundkurven um $\Delta T_{\min}/2$ werden die Temperaturen zu sogenannten Intervalltemperaturen, im Gegensatz zu den Prozesstemperaturen der aufzuheizenden und abzukühlenden Produktionsmedien der „normalen“ Verbundkurven (Composite Curves). Dies bedeutet, dass bei den abgelesenen Temperaturen der Gesamtverbundkurven auf der Heizseite jeweils $\Delta T_{\min}/2$ addiert bzw. auf der kalten Seite $\Delta T_{\min}/2$ subtrahiert werden muss, um die entsprechenden Mediumtemperaturen (z.B. Heisswasser, Kühlwasser) zu erhalten.

N.B. 2.: Die schraffierten Dreiecke im Bild 41 rechts sind Zonen, in denen eine prozessinterne Wärmerückgewinnung möglich ist und daher keine externe Wärmezufuhr resp. -abfuhr benötigt. Die aufwendige Rechnung zur Erstellung der Gesamtverbundkurve kann durch das mit namhafter Unterstützung des *Bundesamtes für Energie* an der *ETH-Lausanne* entwickelte Programm *PinchLENI* [4] einfach erledigt werden.

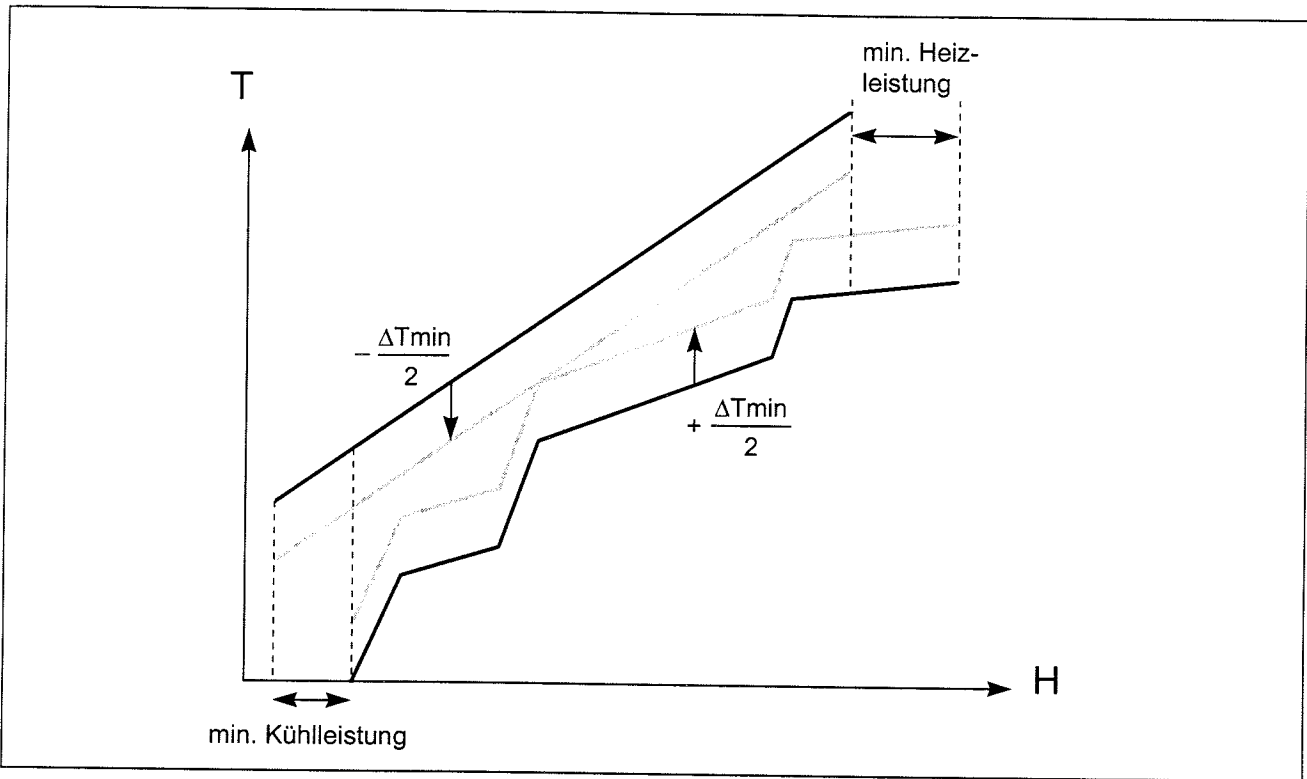


Bild 40: Annäherung der Verbundkurven [9]

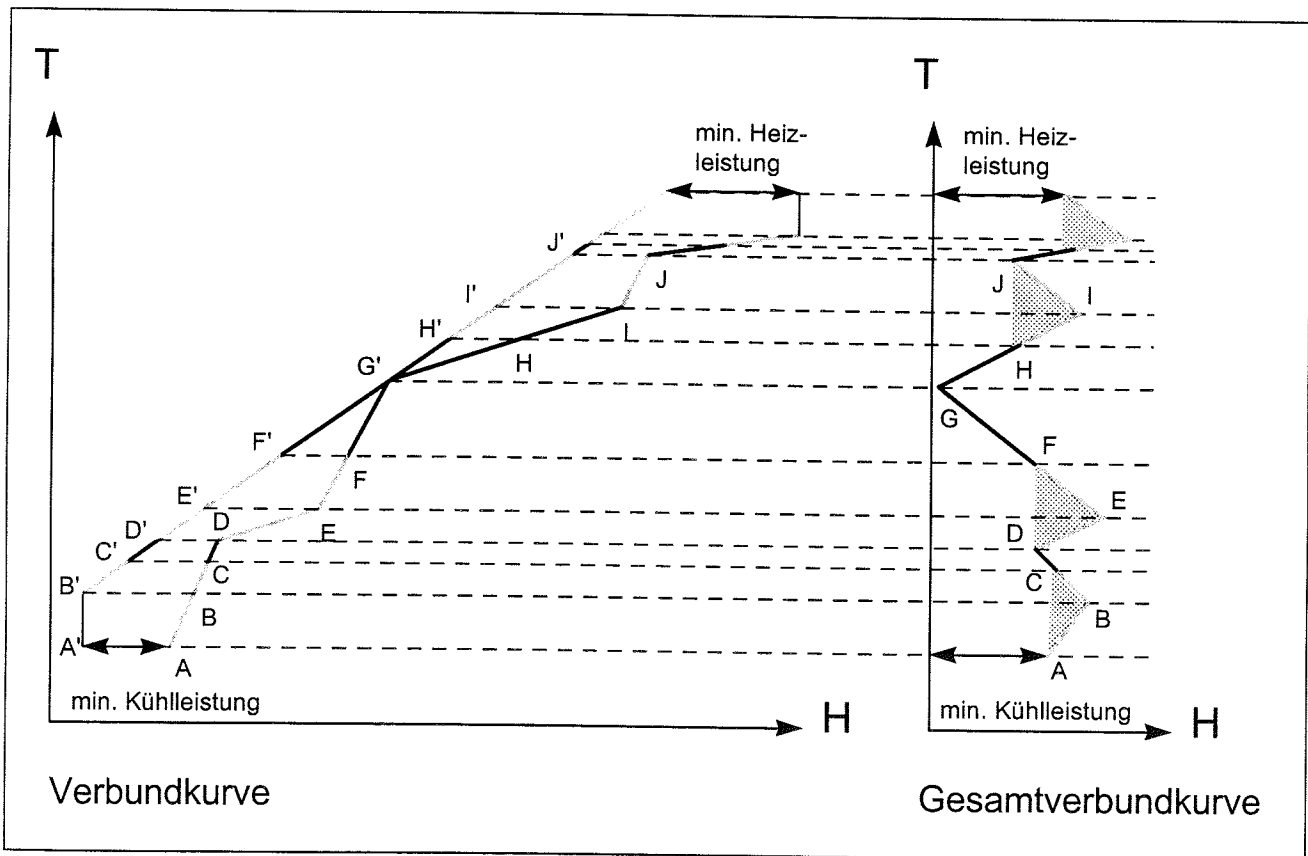


Bild 41: Aufbau der Gesamtverbundkurve [9]

8.3 Utility Placing

Der Begriff „Utility Placing“ stammt aus dem englischen und bedeutet etwa Platzierung und Festsetzung der optimalen Wärme- und Kälteversorgung v.a. hinsichtlich der Temperaturen. Die Energieversorgungseinheiten wie Heizkessel, Kälteanlagen, Wärmepumpen etc. werden in der Gesamtverbundkurve, enthaltend die Prozessanforderungen, so „eingepasst“, dass die entsprechenden Temperaturen und Wärmeleistungen genau dem Bedarf entsprechen.

Heizkessel:

Gemäss dem Hauptprinzip der Energieversorgung (Kap. 8.1) wird die Heizenergie auf dem tiefstmöglichen Temperaturniveau (Bild 42) plziert. In diesem Fall wären sogar 2 Temperaturniveaus optimal nämlich H_1 und H_2 .

Kälteanlagen:

Auf der Kälteseite hat man ein ähnliches Bild bezüglich der im optimalen Fall 2 Temperaturniveaus. Die Kälteenergie wird hier nun auf dem höchstmöglichen Temperaturniveau plziert. Die Temperaturniveaus der Kälteanlagen sollten also bei K_1 und K_2 liegen (siehe Bild 42).

Wärmepumpe:

Gemäss den Folgerungen aus den Pinch-Hauptregeln sowie dem Pinch-Prinzip in Kapitel 6.2 muss bei der elektrischen Wärmepumpe das Wärmereservoir unterhalb des Pinches liegen, weil dort ein Wärmeüberschuss vorhanden ist. Das Wärmeabgabenniveau muss hingegen oberhalb des Pinches liegen, weil dort ein Wärmemanko vorhanden ist. Das bedeutet, dass der Kompressor über den Pinch arbeitet. Die zugeführte elektrische Leistung wird zum „transportierten“ Wärmebetrag addiert und auf dem oberen Temperaturniveau in Form von Wärme abgegeben. Zusammen mit dem Hauptprinzip der Energieversorgung (Kap. 8.1) ergeben sich die optimalen Temperaturniveaus bei WP'_1 und WP''_1 (siehe Bild 43). Eine Wärmepumpe, die auf eine höhere Temperatur arbeitet, ist nicht mehr optimal in der Anlage plziert mit entsprechend tieferer Leistungsziffer und höherem Strombedarf.

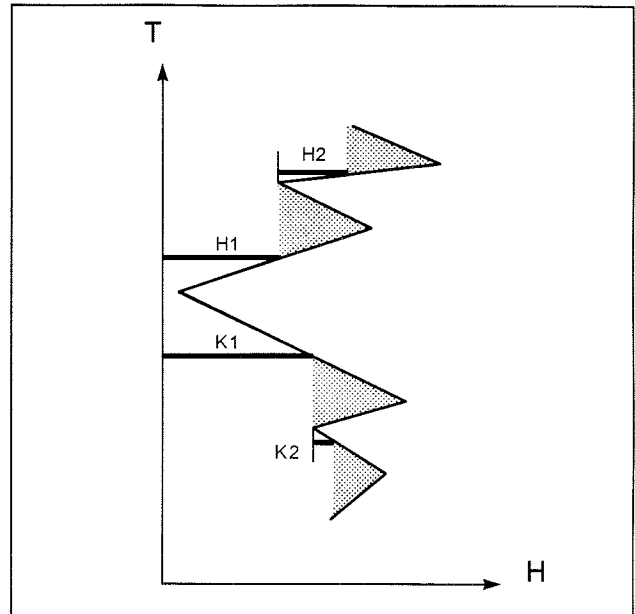


Bild 42: Platzierung von Heizkessel und Kälteanlagen

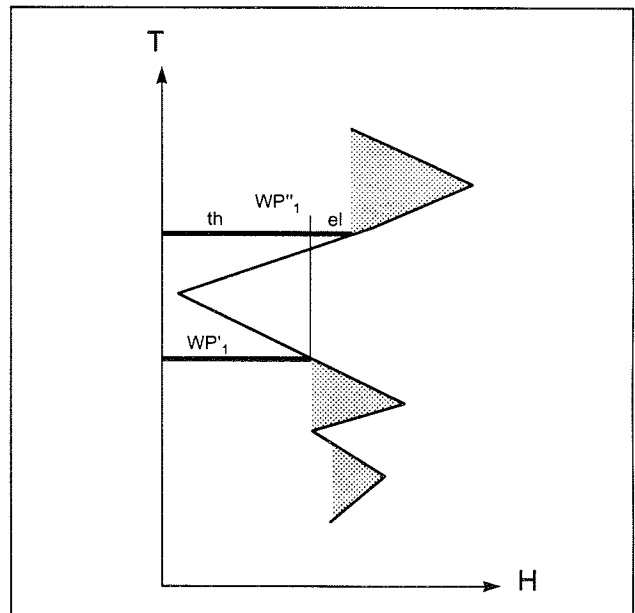


Bild 43: Platzierung von Wärmepumpen

Wärme-Kraft-Kopplungsanlage:

Die WKK-Anlage z.B. mit Gasturbine kann nur Abwärme an die Produktionsanlage abgeben. Dies muss gemäss dem Hauptprinzip der Energieversorgung (Kap. 8.1) im Falle der Gasturbine mit Rauchgaswärmenutzung und ohne Kondensationserscheinungen durch den Temperaturverlauf WKK_1 erfolgen (Bild 44). Die Steigung der Geraden entspricht nach Gl.(6) $1/CAP$. Die Abwärmeniveaus können aber auch mehrstufig horizontal z.B. bei Blockheizkraftwerken sein.

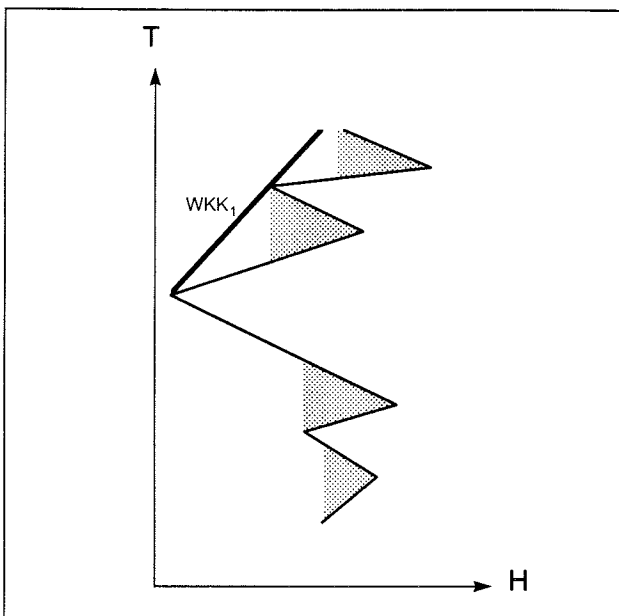


Bild 44: Plazierung der Abwärme von Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen

8.4 Beispiel Utility Placing

Problemstellung I:

Für gegebene Prozessanforderungen aus einem chemischen Prozess wurden die Verbundkurve, die minimale Temperaturdifferenz ΔT_{min} berechnet (siehe nebenstehende Tabelle 45).

Die Gesamtverbundkurve ist in Bild 46 für obige Werte gezeichnet. Für eine berechnete minimale Temperaturdifferenz von $\Delta T_{min} = 20$ K soll die Wärmeleistung des Hochdruckdampfes (290°C) sowie des Mitteldruckdampfes (180°C) bestimmt werden. Ferner soll die abzuführende Kühlleistung mittels Kühlwasser bei 20°C bestimmt werden. Die Kurven der drei Versorgungsmedien sollen eingezeichnet und die Frage beantwortet werden, ob die vorgegebenen Temperaturniveaus noch optimiert werden könnten.

Vorgehen (Bild 47):

Der Hochdruckdampf mit 290°C wird um $\Delta T_{min}/2 = 10$ K erniedrigt, d.h. bei 280°C eingezeichnet. Für den Mitteldruckdampf wird eine entsprechende Temperatur von 170°C eingezeichnet.

Eine vertikale Linie wird durch die Spitze der Gesamtverbundkurve bei 230°C gezogen.

Damit können die Beträge von 3'200 kW_{th} Hochdruckdampf und 1'700 kW_{th} Mitteldruckdampf bestimmt werden.

Die Kühlenergie bei 20°C wird um $\Delta T_{min}/2 = 10$ K erhöht bei 30°C eingezeichnet sowie ebenfalls eine vertikale Linie durch das untere Ende der Gesamtverbundkurve bei 50°C gezogen.

Daraus resultiert eine notwendige Kühlleistung von 750 kW_{th}.

Die Temperaturniveaus des Mitteldruckdampfes können noch bis zu einer Temperatur im Diagramm von 150°C entsprechend tatsächlichen 160°C gesenkt werden. Das Temperaturniveau seinerseits darf bis auf eine Temperatur im Diagramm von 50°C entsprechend tatsächlichen 60°C erhöht werden, um die Prozessanforderungen noch zu erfüllen.

Prozessanforderung		
Start Temp [C°]	End Temp [C°]	Wärmekapazität [kW/K]
260	60	20
240	239	3400
105	270	60
30	200	10

Daten der Energieversorgung	
Hochdruckdampf	290°C
Mitteldruckdampf	180°C
Kühlwasser	20°C
$\Delta T_{min} = 20$ K	

Tabelle 45: Prozessanforderungen

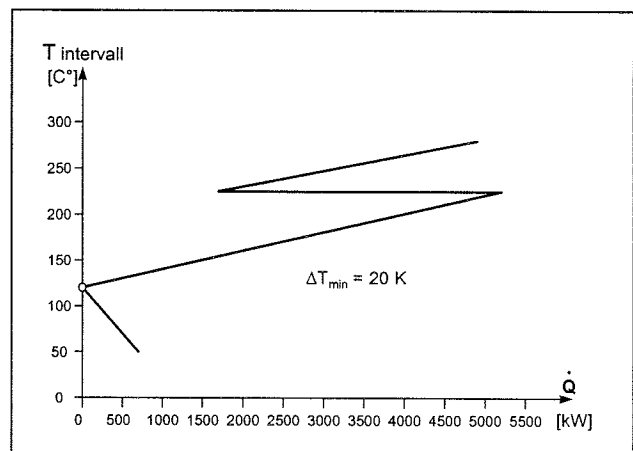


Bild 46: Gesamtverbundkurve

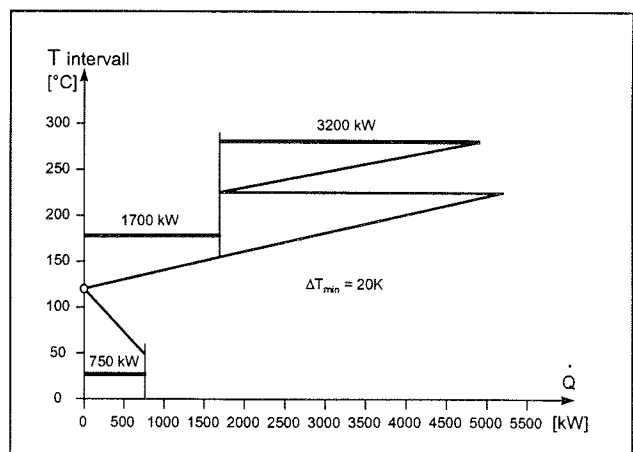


Bild 47: Gesamtverbundkurve mit eingezeichneter Energieversorgung

Problemstellung II:

Es stehen statt Hochdruckdampf Abgase (500°C) einer Gasturbine (3 MW_{el}) zur Verfügung. Die Kurven der Abgase der Gasturbine sowie des Mitteldruckdampfes sollen in Bild 46 eingezeichnet sowie die noch benötigte Wärmeleistung des Mitteldruckdampfes berechnet werden.

Ohne Kondensation kann der Wärmestrom näherungsweise aus der Gl.(2) berechnet werden.

Vorgehen (Bild 48):

Vom oberen Ende der Gesamtverbundkurve senkrecht auf 500°C hinauf wird der Startpunkt gesetzt. Von dort aus nach schräg links hinunter, die Spitze der Gesamtverbundkurve bei 230°C berührend, wird eine Linie gezogen, welche das Abgas der Gasturbine darstellt.

Vom 2. Berührungspunkt mit der Gesamtverbundkurve aus wird dann horizontal der Mitteldruckdampf eingezeichnet. Die resultierende Länge der Mitteldruckdampflinie ergibt dann die gesuchte Wärmeleistung von 600 kW_{th}.

N.B. Bei beiden Problemstellungen wird das Hauptprinzip der Energieversorgung (Kap. 8.1) angewendet.

Mit diesem Vorgehen kann die Energieversorgung von fast beliebig komplexen Produktionsanlagen einigermaßen übersichtlich optimiert werden.

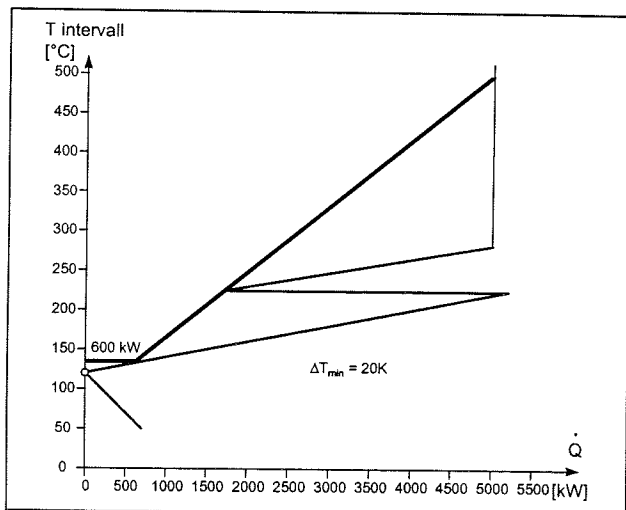


Bild 48: Gesamtverbundkurve mit eingezeichneter Gasturbinenabwärmennutzung

8.5 Total Site Konzept

Die Total-Site Technologie („Site = (Industrie)Werk“) ist eine Erweiterung der Pinch-Methode auf ganze Werke v.a. Industriebetriebe. Sie berücksichtigt die gegenseitigen Einflüsse unabhängig voneinander betriebener Produktionsanlagen und der Infrastruktur (Energieversorgung, Abwasserreinigung), d.h. mit dieser Technologie können einzelne Anlagen optimal in den Gesamtanlagenzusammenhang hinein geplant werden.

Zielsetzung der Technologie ist, bei Neu- und Erweiterungsprojekten eine Investitions- und Betriebskostenoptimierung für das ganze Werk zu erreichen. Die Methode führt Informationen der einzelnen Produktionsanlagen, der Energieversorgung sowie den entsprechenden Verbesserungsmaßnahmen auf Anlagenebene zusammen und hilft eine Gesamtstrategie aufzubauen, welche in eine sogenannte „Road Map“, einer Art **Masterplan** mündet. Diese ermöglicht eine kapital- und betriebskostenmässig optimale Weiterentwicklung eines Produktionswerkes und ist damit auch ein Managementwerkzeug für zukünftige Investitionsentscheidungen.

Einen Einstieg in die Total Site Technologie geben die Literaturstellen [7], [8].

9. Planungshierarchie mit dem Zwiebelschalenmodell

Für die optimierte Anlagenplanung ist ein hierarchisches Vorgehen wesentlich. Dieses kann mit dem Zwiebelschalenmodell (Bild 49) veranschaulicht werden. Zuerst werden die eigentlichen Prozesse wie Reaktoren, Trockner, Kocher, Verdampfer etc. optimiert, wobei in dieser Ebene die Reaktoren Priorität haben. Anschliessend folgt die Optimierung des Wärmetauschernetzes, d.h. der Wärmerückgewinnung mittels Prozess- und Klimawärmetauscher, wobei hier die Prozesswärmetauscher zuerst optimiert werden müssen. In der nächsttieferen Priorität sind Wärmespeicher zu untersuchen (falls von Belang). Erst in der äussersten Schale, d.h. mit letzter Priorität wird der Einsatz von zusätzlicher Infrastruktur wie Heizkessel, Kälteanlagen, Wärmepumpen etc. geprüft. Infrastrukturelemente sind im allgemeinen auch bedeutend teurer und weisen längere Payback-Zeiten auf als die Massnahmen der inneren Schalen. Es ist schnell ersichtlich, dass geschickte

Verbesserungen auf Stufe Prozess mehr Wirkung auf die Gesamtanlage mit weniger Investitionen erreichen als auf Stufe Infrastruktur.

Die Grundidee dieses Vorgehen ist die Konzeption einer den **Prozessanforderungen und damit dem Nutzen entsprechenden „massgeschneiderten“ Anlage**, die damit bezüglich der Gesamtkosten (Kapital- und Betriebskosten) optimal ist.

Der **Verfahreningenieur** muss sich bei der Anlagenplanung von innen nach aussen durch alle vier Schalen des Zwiebelschalenmodells durcharbeiten. Während für ihn die innerste Schale aus dem Optimieren der chemischen Reaktion und der Trennsysteme besteht, bedeutet Prozess für den **Haustechnikplaner** z.B. die Nutzung (Personen, innere Lasten) eines Warenhauses. Die Hauptunterschiede liegen also in der Art Prozesse, die beide Planergruppen haben.

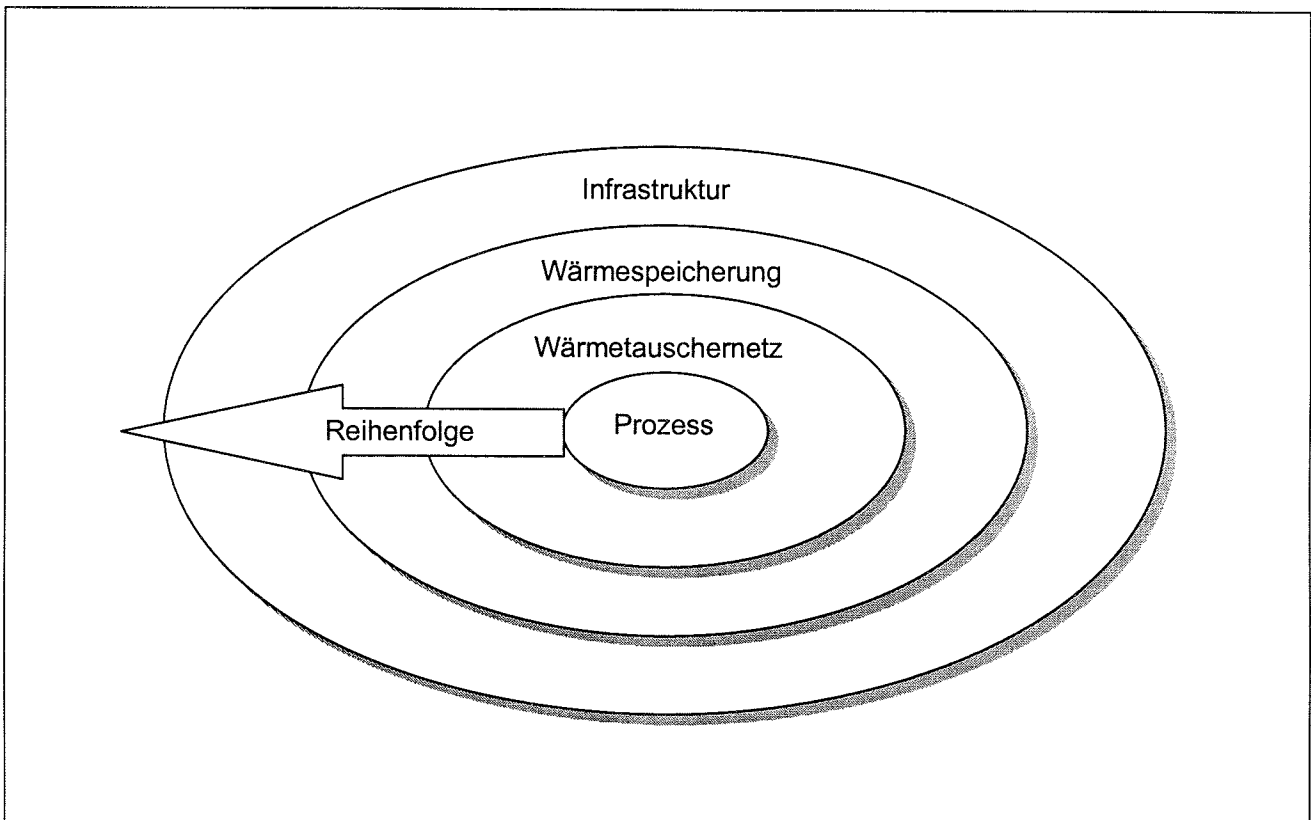


Bild 49: Zwiebelschalenmodell:

- *Prozess: Reaktoren oder Trennapparate (z.B. Trockner, Destillation)*
- *Wärmetauscher: Prozess- und / oder Klimawärmetauscher*
- *Wärmespeicher: v.a. Zwischenspeicherung von Wasser*
- *Infrastruktur: Heizkessel, Kälteanlage, Wärmepumpen, etc.*

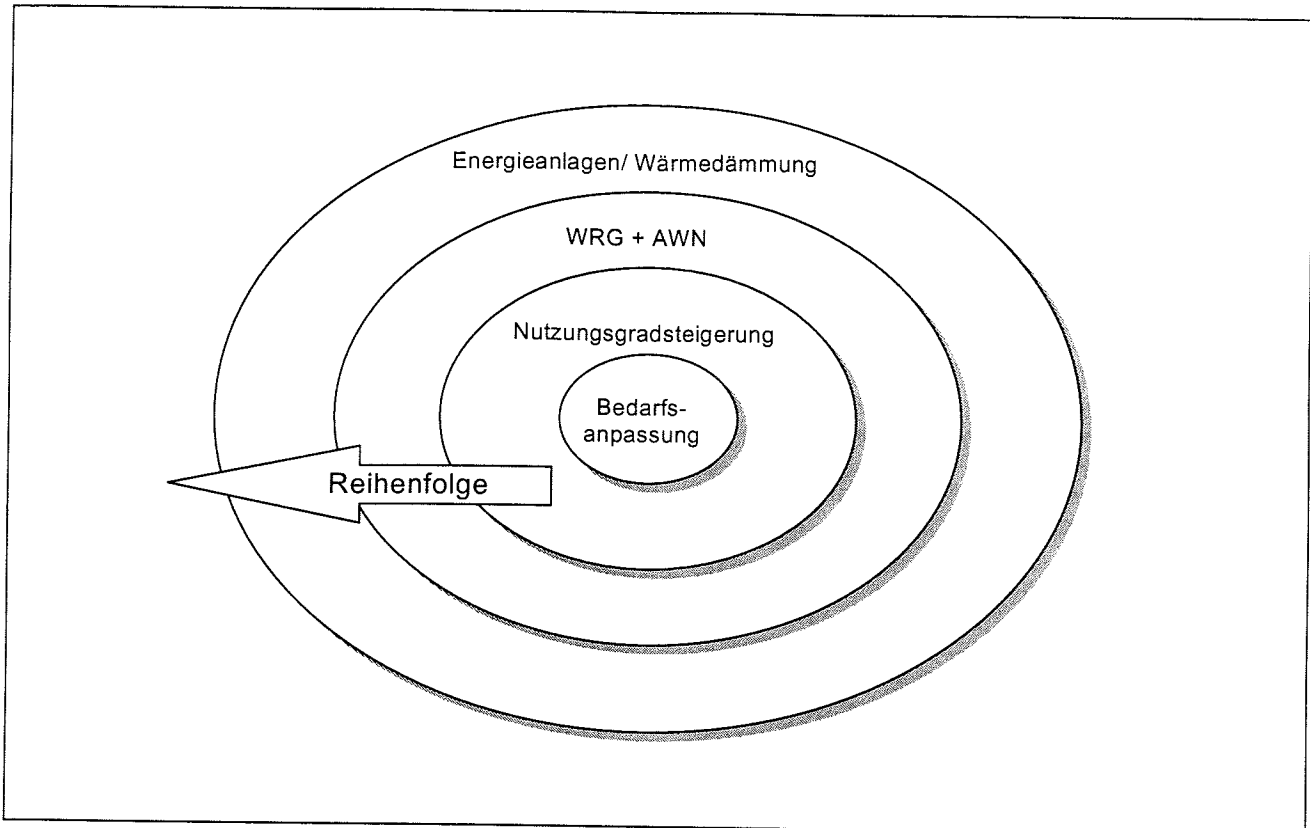


Bild 50: Zwiebelschalenmodell in der Haustechnik

- *Bedarfsanpassung: Raumnutzung (z.B. Anzahl Personen etc.).*
- *Nutzungsgradsteigerung: Verbesserung des Nutzungsgrads der betriebstechnischen Anlagen*
- *Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung: Konzept mit WRG/AWN-Anlagen oder Sanierung*
- *Energieanlagen/ Wärmedämmung: Einsatz erneuerbarer Energie, Wärmedämmung*

Gemeinsam ist beiden Planergruppen, dass das Zwiebelschalenmodell einen **roten Faden** der Anlagenplanung darstellt.

Im Fall der **integrierten Industrieplanung** können Verfahreningenieur und Haustechnikplaner sich gegenseitig in die Hand arbeiten, d.h. sie verwenden beide das **gleiche** Zwiebelschalenmodell, wobei der Haustechnikplaner die verfügbaren Abwärmen aus der Produktion zur Weiternutzung verwendet. Ein solches Vorgehen ergibt Industriebauten, die hinsichtlich Energiebedarf und Kosten vorbildlich sind.

In der **Haustechnik** geht es beim Prozess um die **Bedarfsreduktion** durch optimale Anpassung an

die Bedürfnisse der Betreiber/ Verbraucher (Siehe Bild 50). Dazu gehören die Anpassungen der Betriebszeiten und der Temperaturniveaus. Zum gleichen Bereich, mit etwas höherem Aufwand zählen die verlust-vermindernden Massnahmen, wie die verschiedenen Nutzungsgradverbesserungen. In der nächsten Zwiebelschale befindet sich die Massnahmen zur direkten Nutzung der Wärme-gewinne der Sonne, Geräte und Personen. Mit höheren Investitionen kommen Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung zum Zuge. Erst in der äussersten Zwiebelschale untergebracht ist die Bereitstellung der notwendigen Energie zur Deckung des Restbedarfs mit erneuerbaren Energien, WP, WKK oder konventionell (Holz, Gas, Öl) und die Wärmedämmung von Gebäuden.

10. Verbindung mit der Haustechnik

10.1 Schnittstelle Verfahrenstechnik-Haustechnik

Bei der Planung einer Produktionsanlage werden strenge Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit gestellt. Voraussetzung für einen minimalen Produktpreis ist ein optimales Kosten- / Nutzenverhältnis auf allen Planungsstufen. Es ist nicht sinnvoll, wenn der Verfahreningenieur mit einem grossen Aufwand eine Kostenminderung erzielt, und diese Einsparungen bei der Haustechnik durch nicht optimierte Anlagen verloren gehen. Verfahrenstechnik- und Haustechnik-Planer sollen daher Aufwand und eingesetzte Technologie koordinieren.

Ein Teil der für den Betrieb einer Produktionsanlage erforderlichen Energie wird entweder als Abwärme an den Raum abgegeben oder über Direktkühlung an die Umgebung abgeführt (Bild 51). Die Minimierung des Energiebedarfs einer Produktionsanlage gehört zu den Aufgaben des Verfahreningenieurs, die optimale Verwendung der anfallenden Abwärme fällt unter die Verantwortung des HLK-Planers.

10.2 Optimierung mit Gebäude-Simulationsprogrammen

Gebäude-Simulationsprogramme sind geeignete Planungsmittel für verschiedene bekannte Anlagenkonfigurationen in der Haustechnik.

Abwärme an den Raum

Die an den Raum abgegebene Wärme und Schadstoffe müssen mit Hilfe einer Lüftungstechnischen Anlage abtransportiert werden (Bild 52). Ohne effiziente Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung verursacht die Aufbereitung der Aussenluft hohe Betriebskosten. Daher ist der Energieverbrauch ganzjährig und bei allen vorkommenden Betriebsbedingungen sorgfältig zu minimieren, und zwar der Bedarf an Wärme und an elektrischer Energie. Eine Optimierung bedingt die Kenntnis des Energiebedarfs und des Abwärmefalles für jede Betriebsstunde. Bei variablem Betrieb müssen Energiebedarf und Abwärmefall in Abhängigkeit der Tageszeit (oder des Produktionszyklus) definiert werden.

Der Lüftungsplaner muss den Fragenkatalog (Kasten 54) unter Berücksichtigung der vorgegebenen minimalen und maximalen Raumbedingungen beantworten.

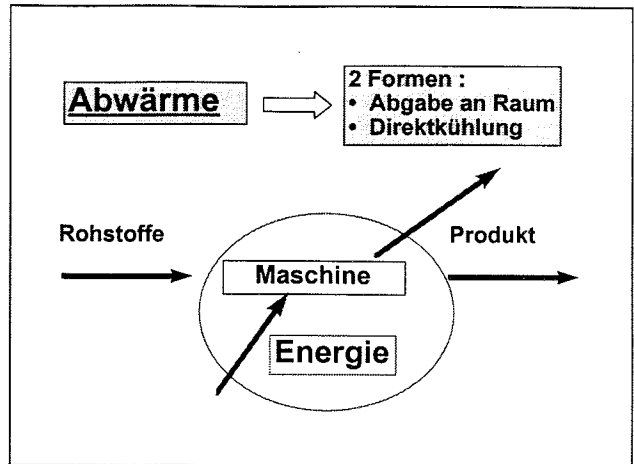


Bild 51: Nutzung der Abwärme einer Produktionsanlage.

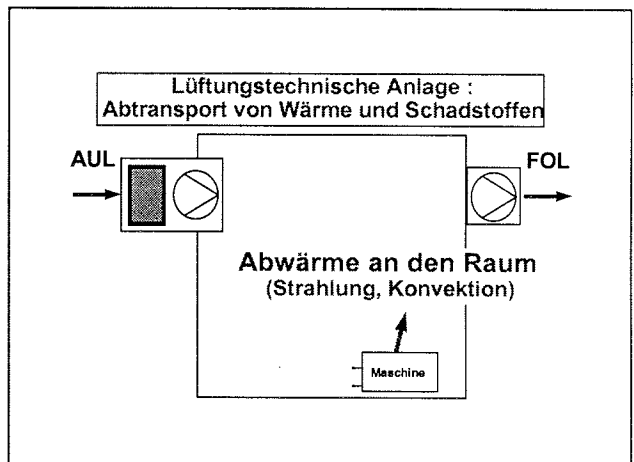


Bild 52: Wärme- und Schadstofftransport durch eine Lüftungsanlage.

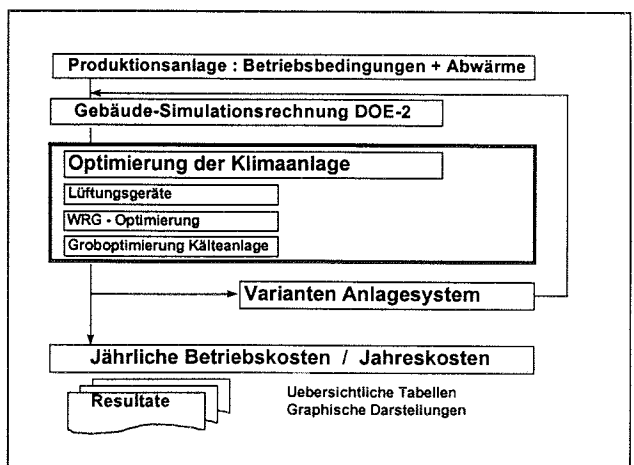


Bild 53: Ablauf der Optimierung einer Klimaanlage

Wirtschaftlichkeitsberechnungen bedingen die Kenntnis des jährlichen Energiebedarfs verschiedener Anlagensysteme in genügender Genauigkeit. Dabei müssen die internen und externen Wärmelasten, die Transmissionsverluste sowie die Speicherfähigkeit des Gebäudes berücksichtigt werden. Diese Berechnungen erfordern den Einsatz eines dynamischen Gebäude-Simulationsprogramms. Statische Verfahren führen zu unzulässig grossen Fehlern und sind daher als Entscheidungsgrundlage nicht geeignet.

Die mit Hilfe eines dynamischen Gebäude-Simulationsprogramms berechneten Betriebsbedingungen dienen als Grundlage der nachfolgenden Anlage-Optimierung, bei welcher die energierelevanten Komponenten so lange variiert werden, bis die minimalen Jahreskosten gefunden sind (Bild 53).

WRG-Optimierung

Eine WRG soll dazu beitragen, dass eine Lüftungstechnische Anlage minimale Jahreskosten erzielt. Sie muss daher bei den am häufigsten vorkommenden Betriebsbedingungen ihre optimalste Leistung erbringen. Dabei ist der Mehrbedarf an elektrischer Energie zu berücksichtigen. Aus diesen Gründen bedingt eine WRG-Optimierung die Kenntnis der Betriebszustände in genügender Genauigkeit. Speziell bei der WRG-Optimierung bringt der Einsatz eines dynamischen Gebäude-Simulationsprogramms grosse Vorteile. Typische Ergebnisse werden in Kasten 56 vorgestellt.

Mit der früher oft angewandten Dimensionierung bei der tiefsten Aussentemperatur und bei den grössten Luft-Volumenströmen kann keine genügende Wirtschaftlichkeit erzielt werden.

Direkte Maschinenkühlung

Wird eine Produktionsanlage direkt gekühlt und weist das Kühlmedium auch im Winter eine höhere Temperatur als ca. 15 °C auf, soll die Nutzung dieser Abwärme geprüft werden (Bild 55). Eine der wirtschaftlichsten Methoden der Abwärmenutzung ist die zusätzliche Erwärmung des Umwälzmediums einer kreislaufverbundenen WRG. Entweder kann damit die AUL höher erwärmt oder der WRG-Lufterhitzer wegen der grösseren Temperaturdifferenzen kleiner dimensioniert werden.

Liegt im Sommer die Temperatur des Kühlmediums über der Aussentemperatur, wird die Abwärme über den FOL-Kühler an die Umgebung abgegeben. Der Rückkühler der Produktionsanlage kann dadurch entweder eingespart oder kleiner dimensioniert werden.

Durch die gleichzeitige Reduktion von Investitions- und Energiekosten weisen Kombinationen von Kreislaufverbund-WRG-Anlagen mit Abwärmenutzung stets eine grosse Wirtschaftlichkeit auf.

Fragenkatalog für Lüftungen:

- Wie gross sind die benötigten Luft-Volumenströme? Die Bestimmung der minimalen Luft-Volumenströme ist eine der wichtigsten Aufgaben des Lüftungsplaners.
- Wie weit muss die AUL erwärmt werden?
- Welche ABL-Temperaturen stehen für die WRG zur Verfügung?
- Soll die Anlage bedarfsabhängig geregelt oder mit Hilfe einer Schaltuhr nach fixen Betriebszeiten gesteuert werden?
- Soll die Anlage einstufig, zweistufig oder mit variablen Luft-Volumenströmen betrieben werden?
- Sind die Aufwendungen für zweistufige Motoren oder für Frequenzumrichter mit der entsprechenden Regelung innert einer vorgegebenen Zeit zu amortisieren?

Kasten 54

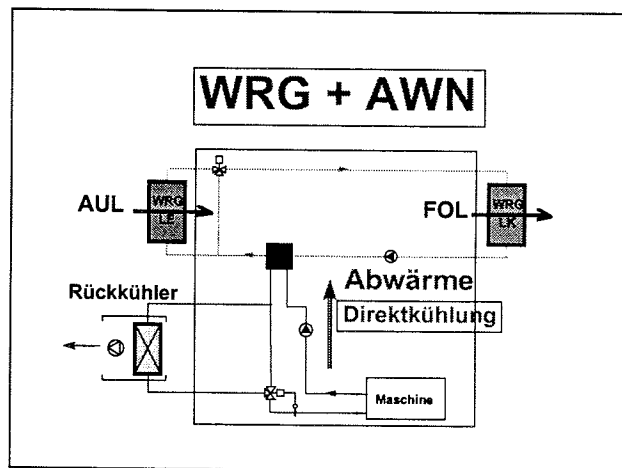


Bild 55: Nutzung der Direktkühlung einer Produktionsmaschine.

Ergebnisse der Gebäude-Simulation in Kombination mit der Anlage-Optimierung

- Luft-Volumenströme in Abhängigkeit der Aussentemperatur mit den entsprechenden Betriebszeiten.
- Bei tiefen Aussentemperaturen und daher grösseren Transmissionsverlusten reichen die minimalen Luft-Volumenströme (Abtransport der Schadstoffe). Bei höheren Aussentemperaturen müssen die Luft-Volumenströme meistens erhöht werden, um die anfallenden Wärmelasten abtransportieren zu können.
- Resultierende Raumtemperaturen als Folge der internen und externen Wärmelasten und unter Berücksichtigung der Speicherefähigkeit sowie der Transmissionsverluste des Gebäudes. Damit kann entschieden werden, ob eine Kälteanlage erforderlich ist. Als massgebende Kriterien dienen sowohl der Verlauf der Raumtemperaturen nach mehreren warmen Sommer- oder Herbsttagen wie auch die Anzahl Stunden, während denen die gewünschte Raumtemperatur überschritten wird.
- Vorteile der adiabatischen FOL-Befeuchtung sind eine Einsparung an elektrischer Energie und - hauptsächlich - kleinere Investitionskosten. Sie vermag aber nur eine beschränkte Kälteleistung zu erzielen und ermöglicht keine Entfeuchtung der AUL.
- Bei der Nachtauskühlung ist der Mehrbedarf an Ventilatorenergie in ein optimales Verhältnis zur Reduktion der Raumtemperatur zu setzen. Falsch betriebene Nachtauskühlung kann einen gegenüber der Kälteanlage mehrfachen elektrischen Energiebedarf bewirken !

Kasten 56

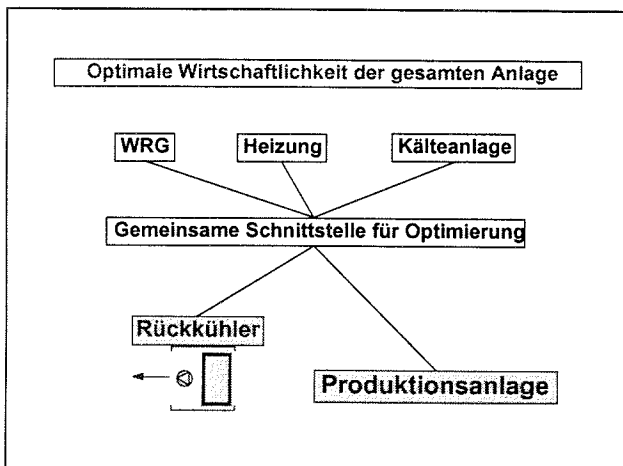


Bild 57: Gemeinsamer Datensatz von Haustechnik und Prozesstechnik.

10.3 Mögliche Kombination von Gebäude-Simulation und PM

Die Anwendung von Gebäude-Simulationsprogrammen war früher kompliziert, aufwendig und nur für wenige Spezialisten geeignet. Für die Bedürfnisse der Haustechnik wurde daher eine Spezialversion für die Wirtschaftlichkeitsberechnung von verschiedenen Anlagensystemen inkl. WRG-Optimierungen einwickelt. Ein PC-Inputprogramm erlaubt dem Lüftungsplaner, alle notwendigen Einflussgrößen ohne Kenntnisse des Gebäude-Simulationsprogramms zu definieren.

Als Ergänzung werden zur Zeit Software-Tools für andere Fachbereiche erarbeitet. Damit kann beispielsweise der Verfahreningenieur alle erforderlichen Einflussgrößen für eine gemeinsame Optimierung definieren, ohne über Kenntnisse der Lüftungstechnik oder der Gebäude-Simulation verfügen zu müssen (Bild 57).

Für eine optimale Wirtschaftlichkeit der gesamten Anlage muss die gegenseitige Beeinflussung der verschiedenen Massnahmen berücksichtigt werden. Bekanntlich verursacht eine WRG zwar höhere Investitionskosten, ermöglicht aber Einsparungen bei der Wärmeerzeugung und Verteilung sowie bei der Kälteanlage inkl. Rückkühlung. Mit zusätzlichen Software-Tools kann nun auch der Einfluß der Abwärmenutzung auf Investitions- und Betriebskosten der gesamten Produktionsanlage berücksichtigt werden.

Der Energiebedarf einer Produktionsanlage wird beispielsweise mittels PM, die lüftungstechnische Anlage inkl. Abwärmenutzung mit Hilfe der Gebäude-Simulation optimiert. In vielen Fällen interessant für die Haustechnik ist der aus der PM resultierende minimale Kältebedarf, der einen hohen Deckungsbeitrag an den Energiebedarf der Haustechnik liefern kann. Unter Einbezug dieser Abwärmequelle werden die haustechnischen Anlagen mit Standard-Programmen aus der Familie der Gebäude-Simulation-Programme optimiert. In einem ersten Schritt wird die Haustechnik separat behandelt. Iterativ müssen anschliessend die Resultate betrachtet und eventuell mit weiteren Varianten durchgerechnet werden. Wünschenswert und Ziel wäre eine vollständig integrale Betrachtung der Gesamtanlage Prozesstechnik-Haustechnik im Sinne der Prozessintegration. Zur Erzielung eines minimalen Produktpreises ist eine Zusammenarbeit von Verfahreningenieuren mit HLK-Planern unerlässlich.

11. Sanierung von Produktionsanlagen

In den vorherigen Kapiteln wurde nicht explizit unterschieden zwischen **Neuanlagen** und **Sanierung von Produktionsanlagen**. Bei Neuanlagen hat der Planer eine einfachere Aufgabe, da er die Prozessanforderungen während der Planung aufstellen oder von der Pilotanlage übernehmen kann und eine diesen Bedürfnissen entsprechende Anlage auf die „grüne Wiese“ projektieren kann, wobei meistens wenige Einschränkungen existieren. Dieser Fall ist in der Schweizer Industrie jedoch selten geworden, weshalb wir uns jetzt auf die speziell im Sanierungsfall auftretenden Besonderheiten und Probleme konzentrieren:

Besonderheiten und Probleme bei Sanierungen

1. Der Aufwand für die Datenerhebung ist höher je nach existierenden Prozessunterlagen.
2. Nicht dokumentierte Veränderungen an den Anlagen bergen Risiken, aber auch die Chance, Nichtidealitäten, die sich mit früheren Veränderungen eingeschlichen haben, durch die systematische Prozessanalyse sozusagen 'by the way' zu entdecken und damit hohe und rentable Kosteneinsparpotentiale zu realisieren.
3. Die technische Restlebensdauer ist abhängig vom Anlagenzustand sowie von der mit der Anlage produzierbaren Produktequalität. Falls diese Qualität nicht mehr den Markterfordernissen entspricht, ist eine Restlebensdauer nicht mehr vorhanden.
4. Es existieren auch Einschränkungen, die den Planungsspielraum stark einschränken wie
 - Layoutgegebenheiten und enge Platzverhältnisse
 - Vorinvestitionen wie z.B. einen früher gekauften teuren Apparat, der noch nicht abgeschrieben ist und für dessen Änderung noch zusätzliche bedeutende Kosten in Kauf genommen werden müssten
 - zu kombinierende Energieströme sind weit voneinander entfernt, da die Fabrik sogenannt „organisch gewachsen“ ist
5. Betriebswirtschaftlich gesehen stellt sich die Frage, ob die Kosten für einen Betriebsunterbruch und damit Produktionsausfall nicht zu hoch verglichen mit den vorgesehenen Einsparungen werden. Optimal ist, wenn die energetische Sanierung mit einem geplantem Umbau oder Revision o.ä. zusammengelegt werden kann.

6. Die Frage der Garantie, falls an bestehenden Anlagen Änderungen vorgenommen werden, welche negative Auswirkungen auf die Funktion haben. Eine enge Zusammenarbeit des Energieplaners mit ausführenden, garantievernehmenden Unternehmen kann dieses Problem entschärfen.

Güte der energetischen Sanierung

Ein weiterer Punkt, der beachtet werden muss ist die Güte der energetischen Sanierung. Eine energetische Sanierung, die zwar Energie spart aber gleichzeitig wesentlich höhere Kapitalkosten verursacht, kann nicht als gut bezeichnet werden. Höhere Kapitalkosten werden im wärmetechnischen Bereich vor allem durch die installierte Wärmetauscherfläche verursacht. Bild 58 zeigt den entsprechenden Zusammenhang.

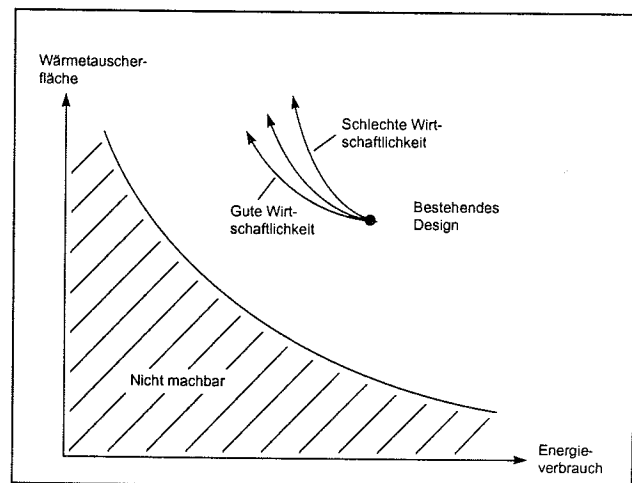


Bild 58: Wärmetauscherflächen Zielwerte [5]

Ein gutes Design lässt die Kapitalkosten neben deutlich reduzierten Betriebskosten nur gering bis moderat steigen, muss also nicht mit deutlich mehr Wärmetauscherfläche erkaufte werden, sondern integriert die Anlagenkomponenten vor allem besser in die Gesamtanlage durch Prozessoptimierung und -modifikation, optimale Kombination von Wärmeströmen, etc.

Wirtschaftlichkeit von energetischen Massnahmen

Bezüglich Realisierungsmassnahmen muss eine ausreichende kurze Payback-Zeit vorhanden sein, wobei „ausreichend kurz“ bedeutet, dass sie in einem vernünftigen Verhältnis zur **Restnutzungsdauer der Anlage** (aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen) stehen muss. Wie rentabel eine Energiesparinvestition über die Nutzungsdauer sein kann, zeigt Tabelle 59.

So erreicht auch eine vermeintlich schlechte Investition mit einer Pay-Back-Zeit von 5 Jahren bei 10 Jahren Nutzungsdauer eine Kapitalverzinsung von 17,2 %, was immer noch einer überdurchschnittlichen Rendite entspricht.

Pay-back-Zeit [Jahr]	Nutzungsdauer [Jahr]					
	5	10	15	20	25	30
1	159.8	161.5	161.8	161.8	161.8	161.8
2	55.5	63.5	64.0	64.0	64.0	64.0
3	25.1	37.5	39.0	39.3	39.3	39.3
4	9.7	24.9	28.1	28.1	28.3	28.3
5	0.0	17.2	20.7	21.6	21.9	22.0
6		11.9	16.0	17.3	17.8	18.0
7		7.9	12.6	14.2	14.8	15.1
8		4.7	9.9	11.8	12.6	12.9
9		2.2	7.8	9.9	10.8	11.2
10		0.0	6.0	8.3	9.3	9.9
15			0.0	3.1	4.6	5.5
20				0.0	1.9	3.0

Tabelle 59: Erwartete Kapitalverzinsung [%] bei unterschiedlichen Pay-Back-Zeiten nach Plunkett, 1988

12. Fallbeispiele

12.1 Chemieanlage

Wir beschränken uns in unserem Beispiel [3] auf den Teilschritt der Konzeption eines optimalen Wärmeübertragernetzwerks (zweite Schale im Zwiebelschalenmodell nach Bild 49). Ziel ist hier eine möglichst weitgehende Deckung des Wärmebedarfs einzelner Komponenten einer Anlage durch die Nutzung der Abwärmen anderer Komponenten bei minimalen Gesamtkosten. Von aussen soll möglichst wenig Wärmeleistung zugeführt und nach aussen möglichst wenig Kühlleistung abgeführt werden. Dieses Ziel wird durch das geschickte Anordnen geeigneter Wärmeübertrager zwischen den Strömen einer Anlage mit unterschiedlichen Temperaturniveaus erreicht.

Wir wollen dazu als konkretes Beispiel einen chemischen Prozess [2], der aus einer Reaktion sowie einem Trennprozess besteht, betrachten (siehe Bild 60). Zur Vereinfachung nehmen wir an, dass der Reaktor und die Trennkolonne bereits optimiert sei (innerste Schale im Bild 49). Die Wärmeströme von und zum Rücklaufkondensator resp. Heizung der Trennkolonne müssten in der Praxis selbstverständlich in die Überlegungen zur

Minimierung des Energiebedarfs miteinbezogen werden. Der schwerflüchtige Eduktstrom K3 ist von 20°C auf 155°C zu erwärmen. Durch die Reaktion mit Wärmeabgabe entsteht ein Gemisch H1 von 175°C mit einem höheren Anteil an leichter flüchtigen Komponenten. Dieses Gemisch wird nach der Kühlung auf 45°C in einer Rektifikationskolonne in die leichter flüchtige Fraktion K4 und in die schwerer flüchtige Fraktion H2 getrennt.

Dabei ergeben sich aus den Reinheitsanforderungen in der Rektifizierkolonne eine Kopftemperatur (oberes Kolonnenende) von 40°C und eine Sumpftemperatur (unteres Kolonnenende) von 125°C. Schliesslich ist die schwerer flüchtige Fraktion H2 auf 65°C zu kühlen und die leichter flüchtige Fraktion K4 zur Weiterverarbeitung auf 112°C zu erhitzen. Zur Erfüllung dieser **Prozessanforderungen** müssen den heissen (abzukühlenden) Strömen H1 und H2 Wärme entzogen und den kalten (aufzuwärmenden) Strömen K3 und K4 Wärme zugeführt werden. Die Prozessanforderungen sind in der Tabelle 61 zusammengestellt. Daraus konnten die zu- und abzuführenden Wärmeleistungen berechnet werden:

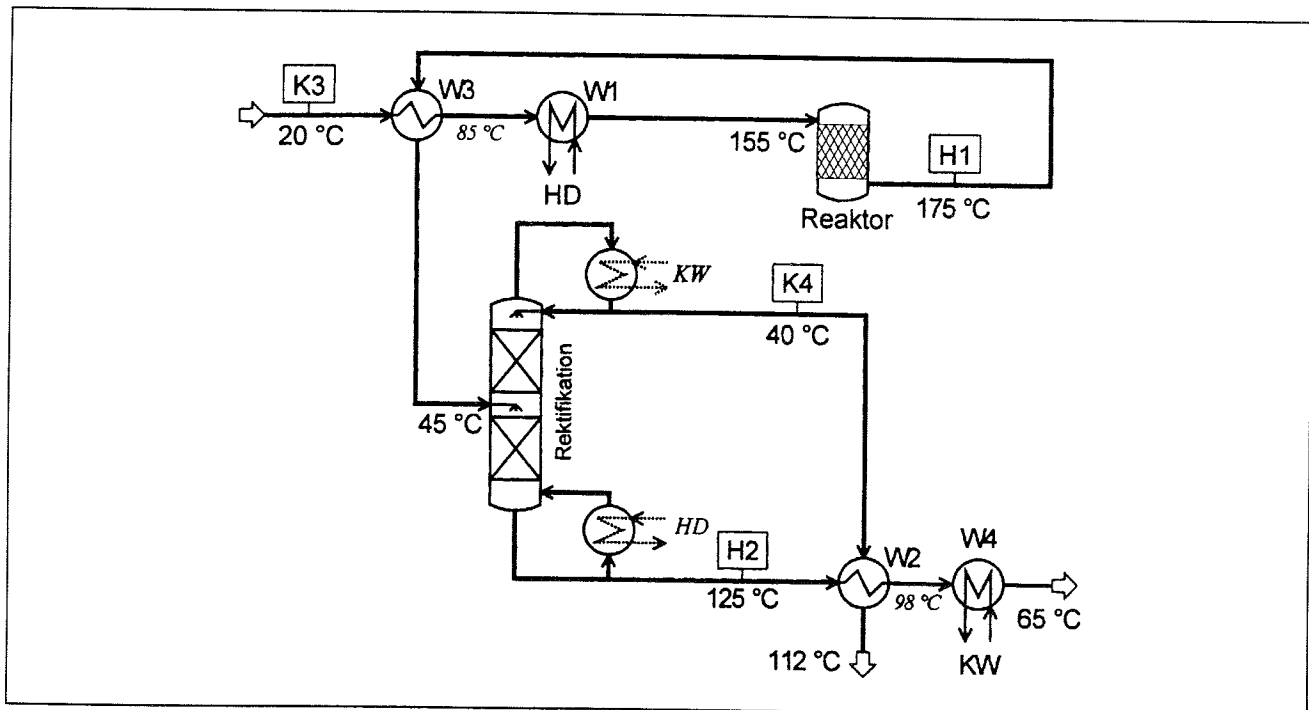


Bild 60: Bestehender Prozess Chemieanlage [3]

Strom	$\dot{m} \cdot c_p$ [kW/K]	Eintritt T_e [°C]	Austritt T_a [°C]	\dot{Q} [kW]
H1	10	175	45	1300
H2	40	125	65	2400
total abzuführen				3700
K3	20	20	155	-2700
K3	15	40	112	-1080
total zuzuführen				-3780

Tabelle 61: Prozessanforderungen

Tabelle 61 zeigt, dass dem Prozess ohne jede Wärmerückgewinnung total 3780 kW_{th} zuzuführen und vom Prozess total 3700 kW_{th} abzuführen wären. Es liegt nahe, die von den heißen Strömen abzuführenden Wärmeströme den aufzuheizenden kalten Strömen zuzuführen.

Die Prozessdaten aus Tabelle 61 „Prozessanforderungen“ werden in das Computerprogramm z.B. *PinchLeni* [4] eingegeben und durch wirtschaftliche, energetische und betriebliche Parameter ergänzt.

Die mit dem Programm berechneten Jahresgesamtkosten sind im Bild 63 in Abhängigkeit der Pinch-Temperaturdifferenz aufgetragen. In unserem Beispiel ergibt sich eine optimale Temperaturdifferenz am Pinch von rund 12°C. Die dazugehörige Verbundkurve (Bild 62) zeigt für die gewählte Pinch-Temperaturdifferenz von 12°C noch eine extern zuzuführende Heizleistung von 340 kW_{th} und eine extern zu erbringende Kälteleistung von 260 kW_{th}.

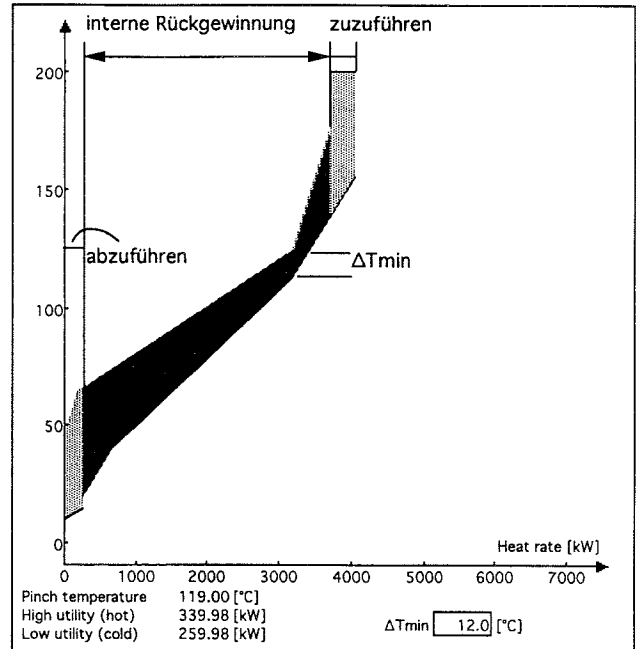


Bild 62: Verbundkurven

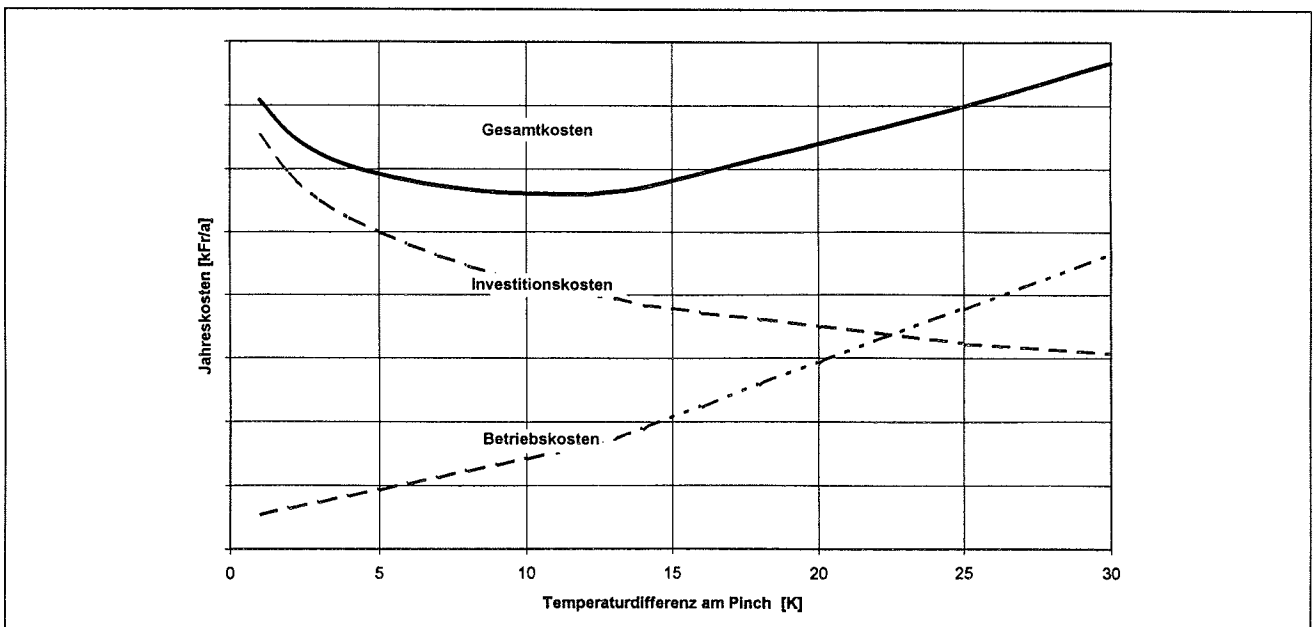


Bild 63: Wirtschaftlichkeitskurven [3]

In diesem Festlegen der optimalen Wärmerückgewinnung vor einer zeitraubenden Detailauslegung liegt einer der **Hauptvorteile der Pinch-Methode** für den Planer.

Nachdem wir uns für eine Pinch-Temperatur von 12°C entschieden haben, können wir ein entsprechendes **Wärmeübertragernetzwerk konzipieren** (Pinch-Design). Wir müssen dazu für ein systematisches Auffinden von sinnvoller Anordnungen von Wärmeübertragern für den Wärmetransport von den heißen zu den kalten Prozessströmen die **Pinch-Regeln** (gemäss Kapitel 7.3) beachten.

Wir wollen nun für unser Beispiel unter Beachtung dieser Regeln eine bessere Lösung finden. Zum Auffinden der geeigneten Verbindungen zur Wärmeübertragung stellen wir die heißen und die kalten Ströme in einem **Netzwerkdiagramm** dar. Das Bild 64 zeigt das mit dem Programm *PinchLENI* [4] aus den Stromdaten der Tabelle 61 und aus der gewählten Pinch-Temperaturdifferenz generierte Netzwerkdiagramm. Wir erkennen darin von links nach rechts die vier Ströme H1, H2 (teilweise gesplittet), K3 und K4 unseres Beispiels mit den Ein- und Austrittstemperaturen [$^{\circ}\text{C}$] in den rechteckigen Kästchen. Alle wärmeabgebenden Ströme werden von oben nach unten und alle wärmeaufnehmenden in umgekehrter Richtung eingezeichnet. In den Kästchen in der Mitte sind die Temperaturen am Pinch eingetragen. In den Kreisen finden wir die zwischen der Pinch-Temperatur und den Ein- und Austrittstemperaturen der vier Ströme zu übertragenden Wärmeleistungen [kW]. Die für das weitere Vorgehen wichtige Trennung zwischen den Zonen über und unter dem Pinch ist übrigens ein grosser Vorteil des Netzdiagramms gegenüber dem Verfahrensflussbild, in dem diese Unterscheidung schwer möglich ist.

Die **Lösungsfindung** läuft nun im Netzwerkdiagramm wie folgt ab: Grundsätzlich verbinden wir nur heisse und kalte Ströme oberhalb und **unterhalb des Pinches** (Hauptregel 1, Kap. 6.2). Wir beginnen bezüglich der Temperaturen am Pinch (Design-Regel a, Kap. 7.3). Wir erkennen sofort, dass wir mit dem Strom H2 die Bedürfnisse für den (praktisch bis zum Pinch reichenden) Strom K4 vollständig befriedigen können (Design-Regeln b, c, d, Kap. 7.3). Da wir dazu vom Strom H2 nur einen Teil der Wärme benötigen, teilen wir diesen entsprechend in die zwei Teilströme H2a und H2b mit den Wärmekapazitätsströmen 22 kW/K und 18 kW/K (Zusatzregel, Kap. 7.3). Zwischen den Strömen H1b und K4 legen wir einen ersten Wärmeübertrager ($1080\text{ kW}_{\text{th}}$).

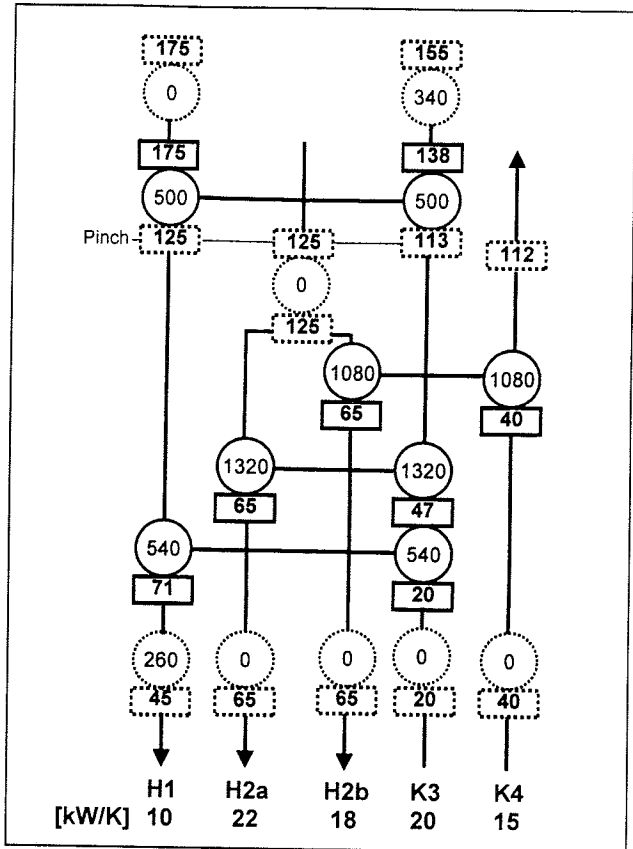


Bild 64: Optimiertes Netzwerk [3]

Durch einen nächsten Wärmeübertrager von H2a zu K3 ($1320\text{ kW}_{\text{th}}$) können wir einen Teil der Bedürfnisse des Stroms K3 decken. Die für K3 verbleibenden $540\text{ kW}_{\text{th}}$ decken wir mit einem dritten Wärmeübertrager von H2 nach K3.

Nun gehen wir auf die Seite **über dem Pinch** und verbinden hier mit einem vierten Wärmeübertrager H1 mit K3. Eine Überprüfung der Temperaturdifferenzen in den einzelnen Wärmeübertragern zeigt, dass wir die gewählte Pinch-Temperaturdifferenz von 12°C nirgends unterschreiten. Wie bereits vorhergesagt, müssen wir dem neuen Prozess noch $340\text{ kW}_{\text{th}}$ zu und vom neuen Prozess noch $260\text{ kW}_{\text{th}}$ abführen. Alle übrigen Wärmebedürfnisse werden bei dieser Lösung prozessintern gedeckt.

Das Programm *PinchLENI* [4] erleichtert das Konzipieren der Verbindungen zwischen den Strömen wesentlich, indem es aus der Eingabe der zu erreichenden Temperaturen (Kästchen in Bild 64) die entsprechenden Wärmeströme berechnet. Die übertragenen Wärmeströme werden in den die Wärmeübertrager symbolisierenden, ausgezogenen Kreisen im Bild 64 angezeigt.

Wir haben zunächst unabhängig vom bestehenden Verfahrensbild (Bild 60) eine neue Lösung gefunden. Erst jetzt gehen wir ins Verfahrensbild und fügen die entsprechenden Wärmeübertrager ein (Bild 65). Der Kühler W4 aus dem bestehenden Verfahrensbild (Bild 60) wird überflüssig. Dafür werden neu die Wärmeübertrager W5 und W6 sowie der Feedkühler W4' nötig (Bild 65). Die von aussen zuzuführende Wärmeleistungsbedarf sinkt mit dieser Lösung um 75 %.

Dieser „erste Wurf“ ist bei guten Ausgangswerten für die Wärmeübergangskoeffizienten und die Wärmeübertragerkosten nahe an einer optimalen Lösung. Nun müssten die Kosten (einschliesslich des Zusatzaufwandes für Verrohrung und Regelung!) und die Wärmeübergangskoeffizienten aufgrund detaillierter Apparate-, Rohrleitungs- und EMSR-Auslegungen genauer ermittelt werden.

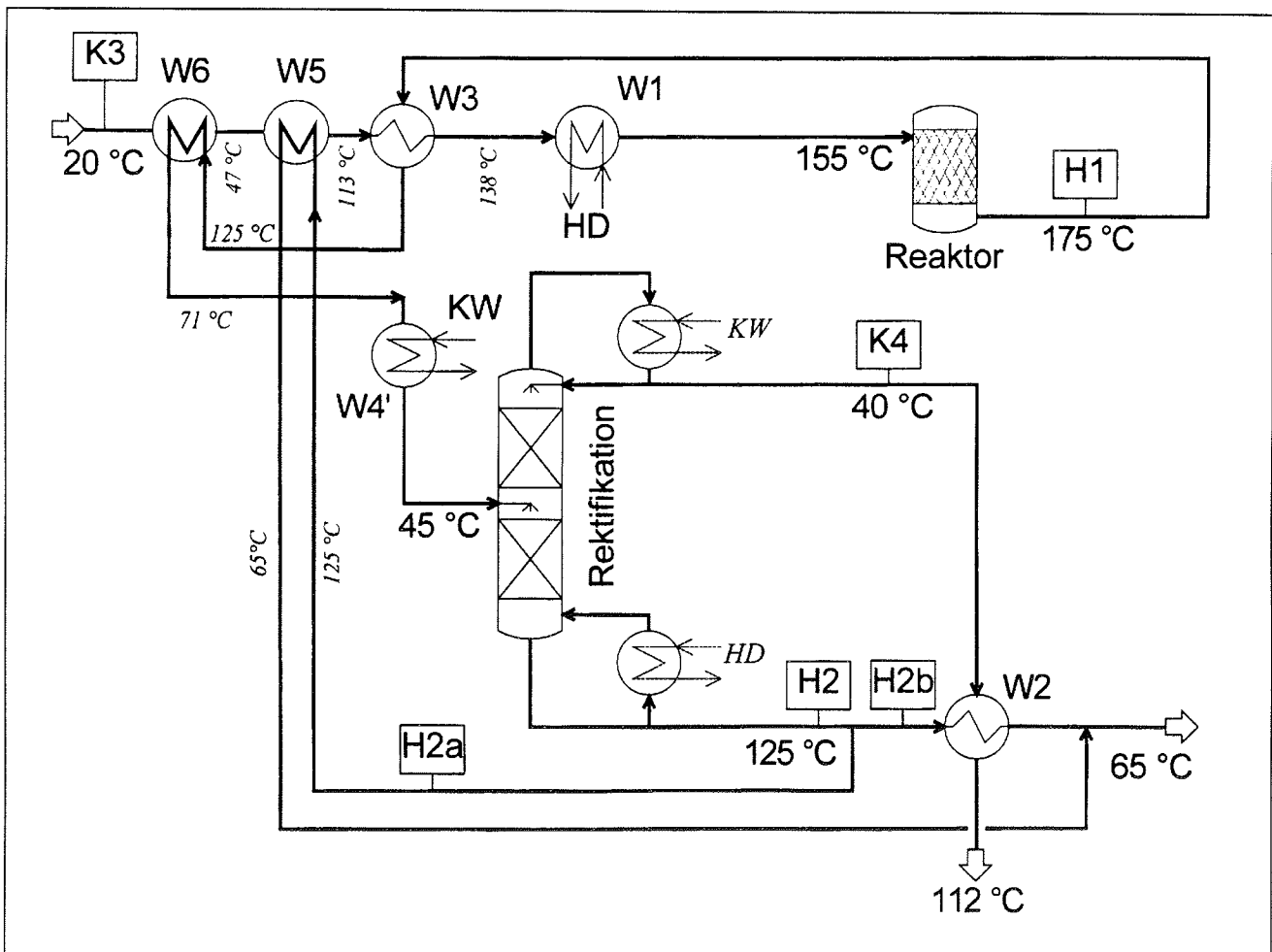


Bild 65: Optimierte Chemieanlage [3]

12.2 Resultate von 6 Fallbeispielen

Um einen Eindruck über realisierte Pinch-Projekte zu vermitteln, sind in der folgenden Tabelle 66 Eckwerte von 6 Studien in der schweizerischen Industrie dargestellt.

Die realisierbaren Energiesparpotentiale lagen zwischen 35 % und 12 %. Mit den zur Realisierung nötigen Investitionen wurden Pay-Back-Zeiten der Investitionen zwischen 2 und 25 Jahren erreicht. Entscheidende Grössen hierbei sind insbesondere die jährliche Betriebsstundenzahl, die Energiebereitstellungskosten, der heutige Optimierungsgrad sowie die Anlagenkonstellation. Unsere Empfehlung reichte von sofortiger Realisierung bis Realisierung nur bei geplantem Ersatz des Apparates oder der ganzen Anlage mit entsprechenden Kombinationseffekten.

Realisierbarkeit, Umsetzbarkeit

Die vorgeschlagenen Massnahmen wurden so konzipiert, dass nur noch Detailengineeringaufwand zu leisten war, d.h. sie waren praxisbezogen und umsetzungsorientiert.

Sofort realisiert wurden die Massnahmen des Projektes Ziegler Papier AG, da dort eine neues Trocknungssystem der Papiermaschine in Planung war. Bei den Projekten Brauerei Valaisanne und Eglisau AG wurden die notwendigen Änderungen an den Anlagen umgehend realisiert.

Bei den anderen Projekten wurden die Energiestudien als Energieleitbild für die Zukunft verwendet. Im Falle der Eternit AG wurde die Erkenntnisse bei neu geplanten Anlagen umgesetzt.

	Eternit	SGO	JCF	MQE	Ziegler	BRVS
Branche	Baustoffe	Lebensm.	Zement	Getränke	Papier	Bier
Energiekosten (kFr./a)	460	160	4'500	320	2'500	165
Energieverbrauch (MWh/a)	14'500	3'600	390'000	7'900	67'000	4'090
davon Prozessenergie (MWh/a)	5'300	3'200	375'000	3'200	67'000	3'775
untersuchte Anlagenzahl	5	8	1	4	1	1
Hauptanlagentyp	kont	batch/div.	kont	kont	kont	batch
heutiger energ. Optimierungsgrad (%)	< 20	ca. 20	85	ca. 35	55	20
mittlere Betriebsstundenzahl (h/a)	2'800	2'300	6'000	4'000	7'500	4'000
realisierbares Einsparpotential (%)	29	35	12	25	13	25
Energiekostenreduktion (kFr./a)	120	17	600	42	332	43
Investition (kFr.)	480	125	8'300	168	414	120
mittlerer Pay-Back der Investitionen (a)	5	8	25	2	2	3

Tabelle 66: Zusammenfassung von 6 Fallstudien

13. Anwendung in der Praxis

Dieses Kapitel zeigt Checklisten, Vorgehen sowie Probleme aus der Praxis; Themen, die bei Kenntnis eine Umsetzung der Methode erleichtern.

13.1 Auswahl von bestehenden Anlagen und Projektchallenging von Neuanlagen

Checklisten für die Anlagenauswahl:

Die Checklisten sind in die drei Fragenbereiche "Verfahrenstechnik", "Kosten" sowie "Veränderungsbedarf" aufgeteilt:

Verfahrenstechnik:

- Art der Verfahrensführung (Batch, kontinuierlich)
- Anzahl und Variation der erzeugten Produkte auf den Anlagen (Mono- und Mehrproduktanlagen)
- Kontinuität der Produktion (Jahresauslastung, Gleichzeitigkeit des Betriebes der Anlagen)
- Grundprozessarten und deren Komplexität (Als besonders geeignet für die Prozessintegration hat sich die thermische Verfahrenstechnik mit Prozesse wie Eindickung- und Trocknung, Trennprozesse, Beschichtungsprozesse sowie Verfahrensführungen mit umweltrelevanten Stoffen wie z.B. Lösungsmittel, Hochtemperaturprozesse (Sinterungen, Schmelzvorgänge). Weniger ergiebig sind Mischprozesse sowie rein mechanische Verfahren)
- Schlüsselfaktoren für Produktqualität
- Technische und sicherheitstechnische Rahmenbedingungen, Normen
- Gesetze, Verordnungen, Auflagen lokaler Behörden
- Patent- und Lizenzfragen

Alle diese Fragen beeinflussen den Freiraum der Prozessgestaltung und damit der Prozessintegration.

Kosten:

- Aufschlüsselung der direkten Herstellkosten der Produkte (Edukte und Betriebshilfsmittel, Energie, Wasser / Abwasser, Abfallentsorgung, Anlagenamortisation, Verluste durch Anfahren und Ausschuss, Personal, etc.)
- Abschätzung der entsprechenden Kostenanteile an der Wertschöpfung im Betrieb

Mit diesem Fragenblock kann abgeschätzt werden, bei welchen Kostenpositionen es sich lohnt, sich

intensiv mit der Suche nach Einsparpotentialen zu beschäftigen.

Veränderungsbedarf:

- Geplante Veränderungen an den Produkten (Produktweiterentwicklung, Produktionsverfahren)
- Geplante Veränderung an der Produktion (Sanierung / Erweiterung von Produktions- und Infrastrukturanlagen, Elimination von Kapazitätsengpässen)

13.2 Ablauf einer Energiestudie mit der Pinch-Methode

Im folgenden wird der Ablauf einer Studie mit der Pinch-Methode prinzipiell gemäss bereits vorliegenden Erfahrungen beschrieben (Bild 67), wobei die Hauptprobleme meistens im Detail während der konkreten Anwendung auftreten (siehe auch Kap. 13.3).

13.3 Anwendungsprobleme (Stolpersteine)

Batch-Mehrprodukte Anlage:

Ein typisches Anwendungsproblem bei Batchanlagen in einem Projekt in der Lebensmittelindustrie war die Produktion in Batch-Mehrzweckanlagen. Bei diesen Anlagentypen (z.B. Kochprozesse) ist kein gleichbleibender Ablaufplan gültig. Die zu verarbeitenden Produkte sind unterschiedlich und die energierelevanten Prozesse sind zeitlich variabel. Zur Lösung solcher Probleme werden v.a. Wärmespeicher eingesetzt, für deren Auslegung die Prozesssimulation eine grosse Rolle spielt. Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass die Produktionsflexibilität für das Bedienungspersonal nicht eingeschränkt werden darf. Sind diese Schwierigkeiten einmal überwunden, sind bedeutende Energieeinsparpotentiale von 30 % erreichbar.

Wärmeübertrager bei Feststoffen:

Bei einer Produktionsanlage zur Beschichtung von mineralischen Grundstoffen stellte sich das Problem, dass die Produktionsmedien nicht rieselfähige Feststoffe sind, die ein schwieriges Handling aufweisen. Automatisch stellte sich die Frage, wie man unter diesen Umständen einen Wärmetauscher definiert. Weitere Probleme ergaben sich beim Modellieren der Energieströme, da gewisse Wärmeübergänge zum vornherein nicht machbar sind (z.B. der Wärmeaustausch von mineralstoffhaltigen Platten untereinander oder



feuchte Abluft, die nicht direkt zur Vorwärmung dieser Platten verwendet werden darf).

Beim Zementprozess zeigte sich, dass die Pinch-Design-Methode mit gewissen Schwierigkeiten beim Aufbau von neuen Anlagenschaltungen einsetzbar ist. Wichtig ist dabei die allgemeine Interpretation des Begriffes "Wärmetauscher", welche beim Zementprozess meistens direkte Feststoff-Feststoff-Wärmetauscher (rieselfähig) ohne Zwischenwand sind. Damit stellt sich sofort die Fragen nach neuen Kostenfunktionen für diese „Wärmetauscher“.

Kontinuierliche Mehrprodukte Anlagen:

Auf Papiermaschinen müssen verschiedene Papiersorten unterschiedlicher Dicke (mehr als Faktor 2 Unterschied) herstellbar sein, d.h. die Anlage muss trotz dieser hohen Variation von Betriebsfällen eine einwandfreie Qualität liefern und energieoptimiert produzieren können. Die Betriebsfälle werden in der Planungsphase durchsimuliert und energetisch für die wichtigsten Fälle optimiert. Die danach ausgewählten Apparate müssen eine entsprechend flexible Fahrweise zulassen.

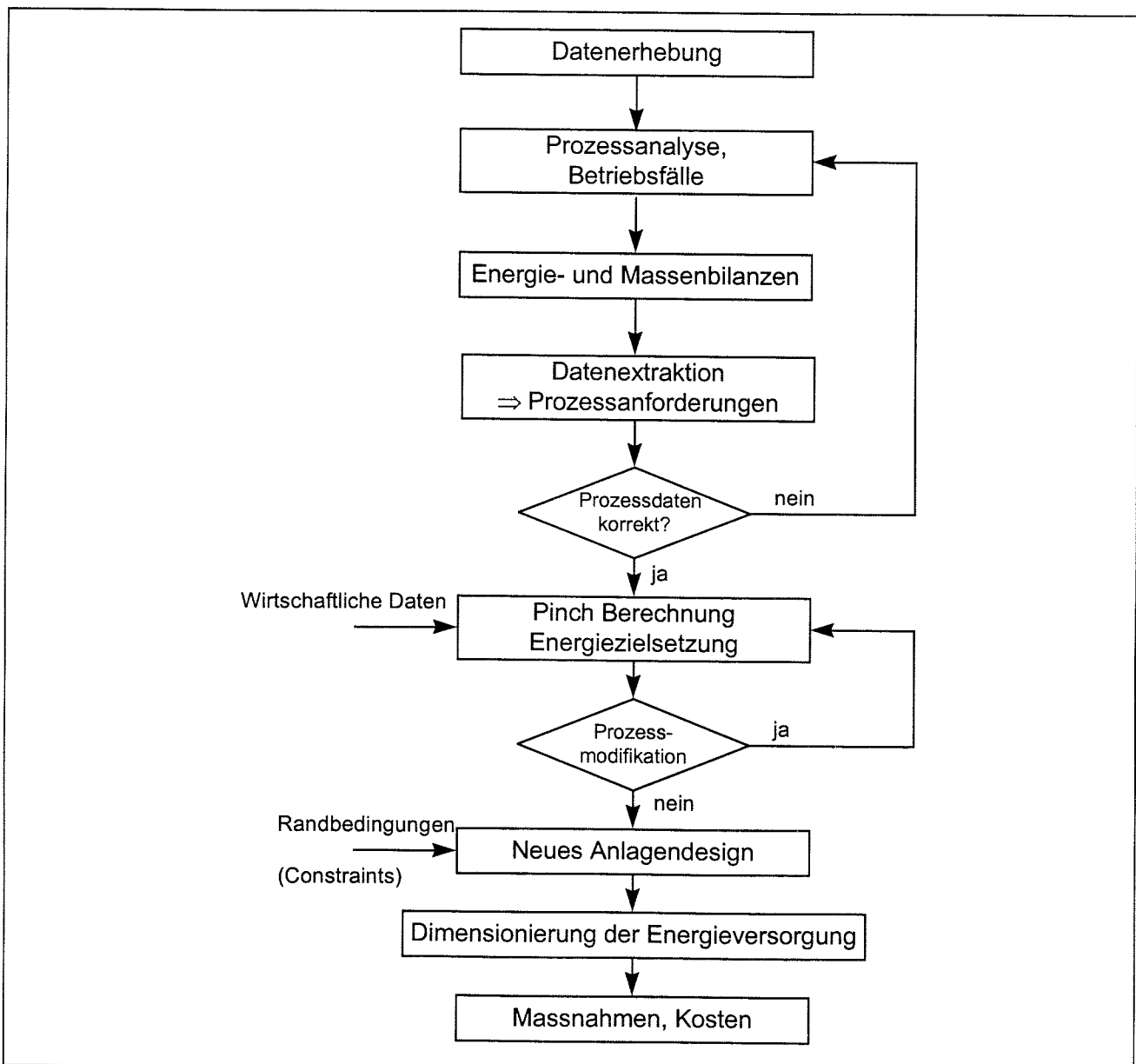


Bild 67: Ablaufschema Pinch Studie

14. Abwasserminimierung

Die Pinch-Methode ist auch im Bereich Abwasserminimierung anwendbar, wobei dort die Zielsetzung „Minimierung der Frisch- und Abwasserkosten“ lautet. Statt Wärmeleistungen und Temperaturen werden im Abwasserfall Wassermengenströme rein und verschmutzt sowie Konzentrationen der verunreinigenden Stoffe z.B. Salzfrachten o.ä. betrachtet. Zusätzlich muss noch in Wertstoffe resp. Schmutzstoffe unterschieden werden.

Das Vorgehen ist analog zum Energiemodell, d.h. man definiert zuerst die Prozessanforderungen. Eine Prozessanforderung ist beispielsweise der maximale Kochsalzgehalt des Netzwassers für die Bierherstellung oder der maximale Zuckergehalt des eintretenden Wassers bei der Herstellung von Orangensaft aus Konzentrat. Diese Prozessanforderungen haben ihren Ursprung oft in der Produktequalität.

Die Prozessanforderungen werden anschliessend zu **einer** Wasser-Verbundkurve und der Versorgungswasserkurve zusammengesetzt (siehe Bild 68), aus welchen die „Wasserzielwerte“ abgeleitet werden können.

Konkrete Verbesserungsmaßnahmen zur Erreichung obiger „Wasserzielwerte“ werden anhand des Wasser-Zwiebelschalendiagramm (siehe Bild 69) kurz erklärt.

Wie beim konventionellen Zwiebelschalendiagramm besitzt die Verfahrensoptimierung des wasserverbrauchenden Prozesses erste Priorität (z.B. verbesserte Filtration des Bierzwischenproduktes Würze). Als Massnahme zweiter Priorität wird dann die Wiederverwendung von leicht verschmutztem Wasser in einem anderen Prozess

geprüft. Ist das nicht möglich, kommen als weitere Möglichkeiten die Regeneration des Abwassers (z.B. durch Ionentauscher) oder das Recycling des Wasser nach Entfernung der Verunreinigungen in Frage. Mit letzter Priorität kommen dann (kapitalintensive) Abwasserbehandlungsverfahren mit entsprechend tiefer Wirtschaftlichkeit zur Anwendung.

Eine erste Einführung in das Thema Abwasserminimierung gibt [7] oder weitere Artikel, die bei den Autoren bezogen werden können.

Beispiel Flaschenreinigungsanlage:

Bei einer Flaschenreinigungsmaschine in der Lebensmittelindustrie konnte durch Hinterfragung der Prozessbedingungen und Verfahrensoptimierung der Wasserverbrauch pro Flasche von 500 ml auf 300 ml reduziert werden. Dies weil Glasflaschen durch PET-Flaschen ersetzt wurden, die geringere Kühlwassermengen durch die geringere spezifische Wärmekapazität benötigten und die notwendige Reinigungsmenge pro Flasche tiefer als beide obige Wasserverbrauchswerte lagen. Die Korrektur der nicht mehr optimalen Betriebsweise ergab also Wassereinsparungen von über 30 % durch die systematische Prozessanalyse und ohne nennenswerte Investitionen.

Die Wasserverbrauchsreduzierung bei obiger Flaschenreinigungsanlage ergab bei den heutigen, im Steigen begriffenen Frisch- und Abwasserpreisen eine deutlich höhere Kosteneinsparung als die reine Energieverbrauchsreduzierung, die parallel durchgeführt wurde. Der entsprechende Faktor Wasserkosten-/Energiekostenreduktion bei dieser Flaschenreinigungsanlage lag bei 4

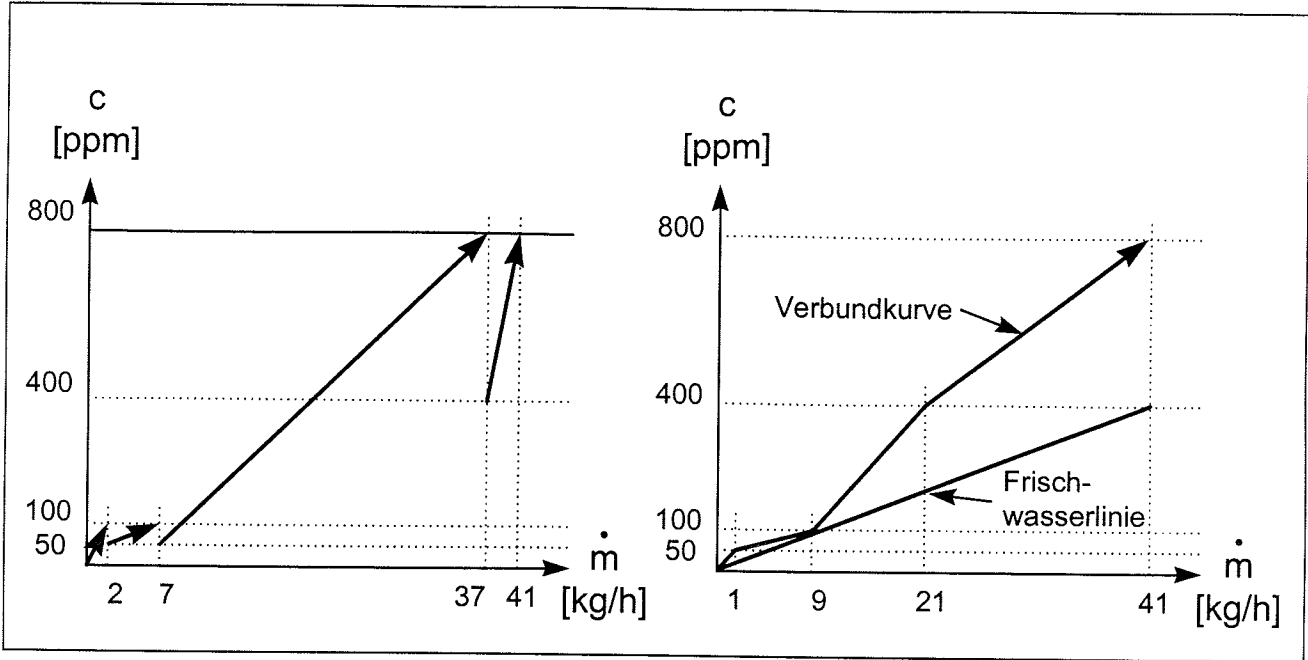


Bild 68: Wasserverbundkurven einzeln und zusammengesetzt

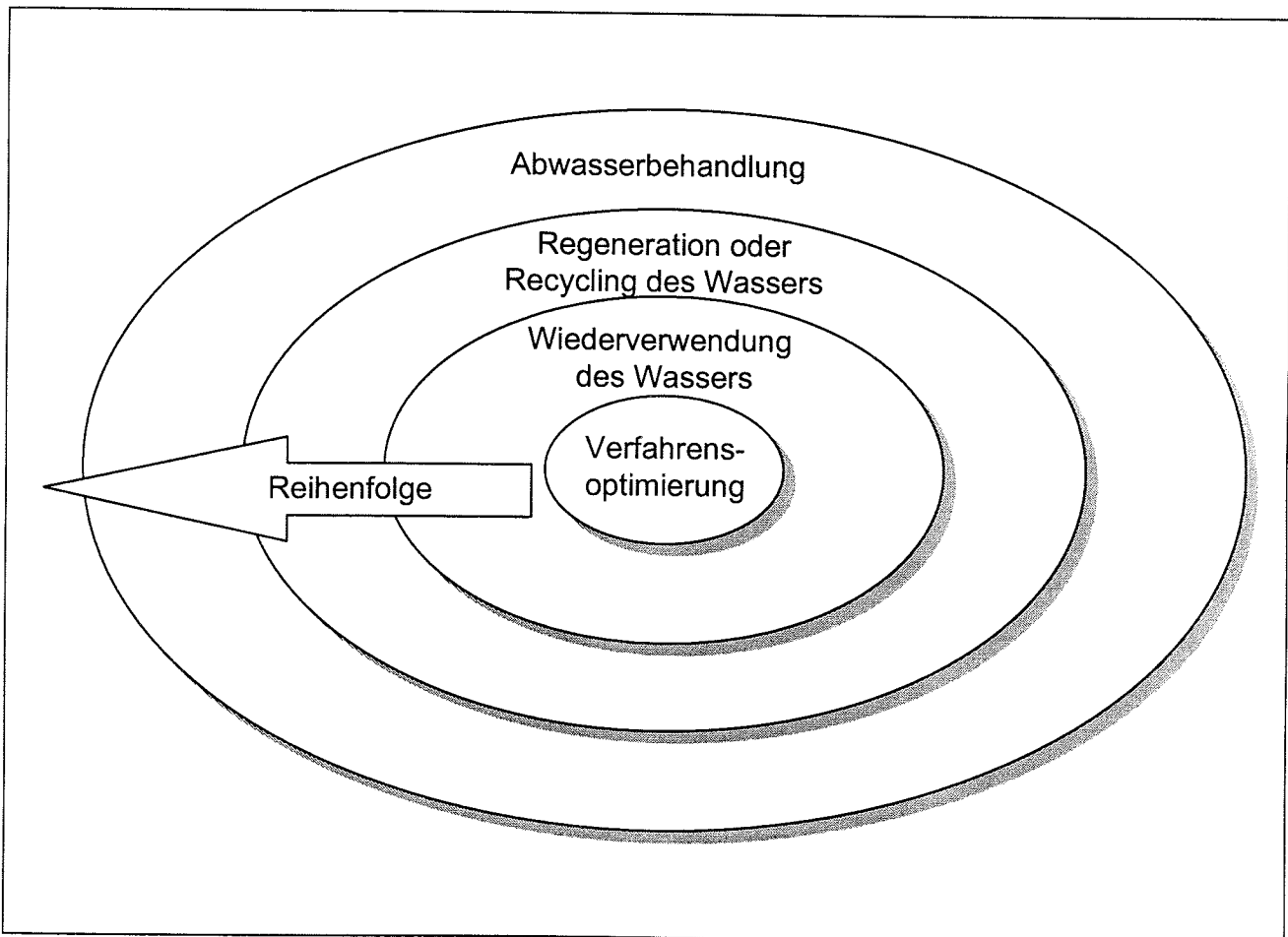


Bild 69: Wasser-Zwiebelschalendiagramm

15. Ausblick

Pinch Methode als Bewertungsinstrument (Analyse)

Die Pinch-Methode kann als Analysen-Werkzeug bei **bestehenden Produktions- und Infrastrukturanlagen** wertvolle Dienste leisten. Sie erlaubt eine Beurteilung hinsichtlich Energieeffizienz verglichen mit dem technischen und wirtschaftlichen Optimum und definiert somit eine Art „energetischer Qualität“ oder auch energetische Güte.

Bei **neu zu erstellenden Produktions- und Infrastrukturanlagen** können die gleichen Aussagen wie oben aber anhand bestehender Projektierungsunterlagen gemacht werden. Man hätte in diesem Fall sogar die Möglichkeit in den Planungsprozess einzugreifen. Bereits vorliegende Projekte können bezüglich energetischer Kriterien bewertet werden z.B. bei Bewilligungsverfahren.

Weiter ist es denkbar, mit Hilfe der energetischen Güte bzw. Optimierungsgrad **gesetzliche Mindeststandards** bezüglich relativem Energieverbrauch für neue aber auch bestehende Anlagen aufzustellen.

Einsatz bei Umweltmanagementsystemen

Die Pinch-Analyse mit der Möglichkeit der Bewertung bestehender Energiesysteme kann als ein Grundelement von **Umweltmanagementsystemen** dienen, wobei der Teilbereich Ressourcenmanagement Energie abgedeckt werden kann. Mit der Pinch-Methode hat man gegenüber Branchenkennziffern oder Zeitreihen mit nur relativer Aussagekraft den Vorteil, dass der absolute energetische Optimierungsgrad ermittelt werden kann, der eine absolute Aussage über die energetische Güte erlaubt.

Mit Hilfe der implementierten Werkzeuge für den Netzwerkentwurf sowie von Kostenfunktionen können auch Aussagen über zu realisierende Massnahmen und deren Wirtschaftlichkeit gemacht werden.

Pinch Methode als Planungsinstrument (Synthese)

Optimal ist die Pinch-Methode als Planungsinstrument beim Um- oder Neubau von Produktionsanlagen eingesetzt. In diesen Fällen ergeben sich bedeutende Synergieeffekte mit der konventionellen Projektierung insbesondere Verbesserungen, die mit geringem Kostenmehraufwand verglichen mit dem ursprünglichen Investitionsvolumen realisiert werden können. Zusätzlich ist die Anlage von Beginn weg energetisch optimal ausgelegt, was sich in erheblich reduzierten **Betriebs- und Kapitalkosten** niederschlägt.

Erweiterung für Batch-Anlagen

Bei Produktionsanlagen mit sich zeitlich verändernder Prozessbedingungen v.a. industrielle Produktion im Batchverfahren wie die Herstellung von Pharmazeutika oder Bier sind zusätzliche Werkzeuge nötig, um eine Optimierung durchführen zu können. Man arbeitet mit Methoden der Ablaufplanoptimierung im Produktionsprozess selber (Scheduling, Time-Event-Model) sowie mit Verbundkurven, die von bestimmten Produktionsabläufen abhängig sind. Weiter wird die Prozesssimulation unterstützend eingesetzt. Eine erste Einführung in diesen Bereich gibt [12]. Bei Batch-Prozessen ist häufig die Prozessoptimierung hinsichtlich Durchlaufzeitreduzierung, d.h. Kapazitätserhöhung Hauptmotivation. Die Energie(kosten) besitzt dann die nächsttiefere Priorität.

16. Literaturverzeichnis

- [1] Meyer, Schiffner; Technische Thermodynamik, ab p.14 und ab p.34, 4: Auflage, Verlag VCH Weinheim, Deutschland, 1989
- [2] Shenoy U. , Heat Exchanger Network Synthesis, Gulf Publishing Company, Houston, USA, 1995
- [3] Zogg, M.: Einführung in die Prozessintegration, Schweizer Ingenieur und Architekt 115(97)38 4/9, 8021 Zürich, Verlags AG der akad. technischen Vereine
- [4] Staine F., Logiciel PinchLeni - version 2.0 PC Windows, Bundesamt für Energiewirtschaft 1995, ENETArt. 30374. Eine Demoversion kann bezogen werden bei: P. Krummenacher, LENI-DGM, EPFL, 1015 Lausanne
- [5] Foundation Course in Pinch Analysis, UMIST Manchester, England, 1993
- [6] Linnhoff B., User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy, The Institution of Chemical Engineers 1982, Rugby, England (Grundlagenwerk)
- [7] Linnhoff B., Pinch Analysis - A State of the Art Overview, TranslChemE, Vol. 71, Part A, September 1993 (Übersichtsartikel)
- [8] Linnhoff B., Use Pinch Analysis to Knock Down Capital Costs and Emissions, Chemical Engineering Progress Nr. 32, August 1994
- [9] Favrat D., Staine F., EPF Lausanne, Intégration énergétique de procédés industriels par la méthode du pincement, RAVEL Industrie, Bundesamt für Konjunkturfagen, 3003 Bern, 1994, bestellbar bei EDMZ 3000 Bern, Bestellnummer 724.321 f
- [10] Morand R., Krummenacher P., Energieoptimierung und Kältekonzept in einer Brauerei, Schweizer Ingenieur und Architekt 115(97)38 10/13, 8021 Zürich, Verlags AG der akad. technischen Vereine
- [11] Bendel R., Prozessintegration auch für meinen Betrieb?, Schweizer Ingenieur und Architekt 115(97)38 37/38, 8021 Zürich, Verlags AG der akad. technischen Vereine
- [12] Krummenacher P., Energetische Integration von Batch-Prozessen, Schweizer Ingenieur und Architekt 115(97)38 27/33, 8021 Zürich, Verlags AG der akad. technischen Vereine
- [13] Morand R., Energiestudie mit der Pinch-Design-Methode bei der Eternit Niederurnen, CADDET Newsletter 4/1994, Internationale Energie Agentur IEA, Hrsg. Infoenergie 5200 Brugg
- [14] Morand R., Energiestudie mit der Pinch-Design-Methode bei der Schweizer Getränke AG Obermeilen, Schweizer Lebensmittel Industrie 9/10 1994, Hrsg. Latenser Food Consulting AG, 8762 Schwändi
- [15] Diggelmann D., Energiestudie mit der Pinch-Design-Methode bei der Mineralquelle Eglisau, Brauerei- und Getränke Rundschau 7/8 1995, Hrsg. Versuchsstation Schweiz. Brauereien, 8059 Zürich
- [16] Diggelmann D., Energiestudie mit der Pinch-Design-Methode bei der Ziegler Papier AG Grellingen, Wochenblatt der Papierfabrikation, Mitte August 1995 Nr. 14/15, Hrsg. Deutscher Fachverlag GmbH, D-60326 Frankfurt a.M.
- [17] Linnhoff, B., Turner, J.A., Chem. Eng. Nov. 2, (1981), S. 52
- [18] Linnhoff, B., Vredfeld, D., Chem. Eng. Progress (1984) 7, S. 33 - 40
- [19] Linnhoff, B., Tjoe, T.N., Chem. Eng. April 28 (1986), S. 1 - 14 und S. 47 - 60
- [20] Linnhoff, B., Kotjabasakis, E., Chem. Eng. Res. Des. Vol. 64 (1986) 5, S 197 - 211
- [21] Smith, R., Chemical process design, McGraw-Hill, Inc., New York 1995, USA
- [22] Gabathuler H.R., et al., Elektrizität im Wärmesektor, Bundesamt für Konjunkturfagen, Bern, Nov. 1991
- [23] <http://www.interduct.wbmt.tudelft.nl> ist informative Internet-Adresse zum Thema Prozessintegration

ARGE Pinch-Team Schweiz

Zürich und Neuenhof, 17. Februar 1998



Anhang A: Übungen und Lösungen

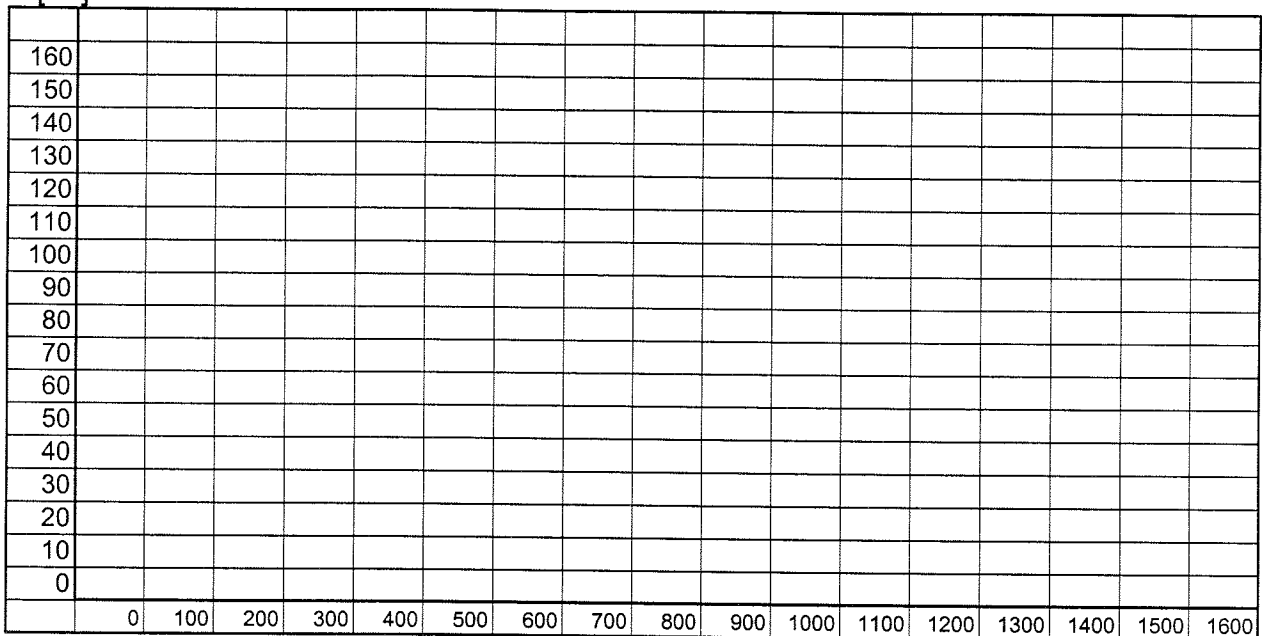
- Blatt A1 : Übung Zielwertfindung 1(leeres Lösungsblatt)/ (Kap. 6)
- Blatt A2 : Lösung zur Übung Zielwertfindung 1 (Kap. 6/ Netzwerkerstellung Kap. 7)
- Blatt A3 : Übung Zielwertfindung 2 (Aufgabenstellung)
- Blatt A4 : Übung Zielwertfindung 2 (Lösungsblatt)
- Blatt A5 : Lösung zur Übung Zielwertfindung 2
- Blatt A6 : leer
- Blatt A7 : Verbundkurve (Übung Netzwerk)
- Blatt A8 : Lösung MER-Netzwerk
- Blatt A9 : Lösung Optimales Netzwerk
- Blatt A10 : Übung Systeme und Bilanzen
- Blatt A11 : Lösung zur Übung Systeme und Bilanzen
- Blatt A12 : Originalanlage Lebensmittel Pasteur
- Blatt A13 : Prozessanforderungen (extrahiert)

Übung Zielwertfindung 1 Kap. 6

Prozessanforderungen und Verbundkurve

	\dot{m} kg/s	c_p kJ/kgK	CP kW/K	T_A °C	T_E °C	\dot{Q} kW
Prod A	1.07	4,0	4.286	30	100	- 300
Prod B	5,625	4,0	22,5	100	140	- 900
Prod C	10	1,4	14,0	160	60	1400

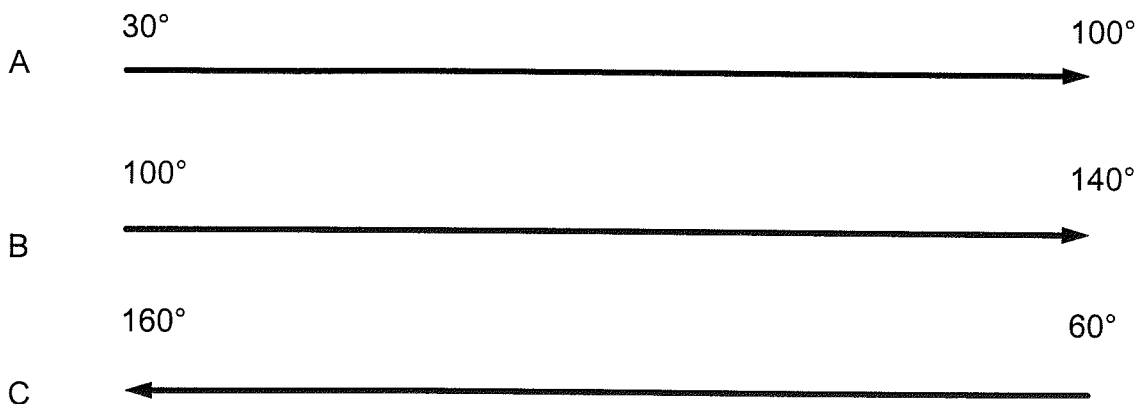
T [°C]



H [kW]

Minimale Temperaturdifferenz: $\Delta T=10$ K

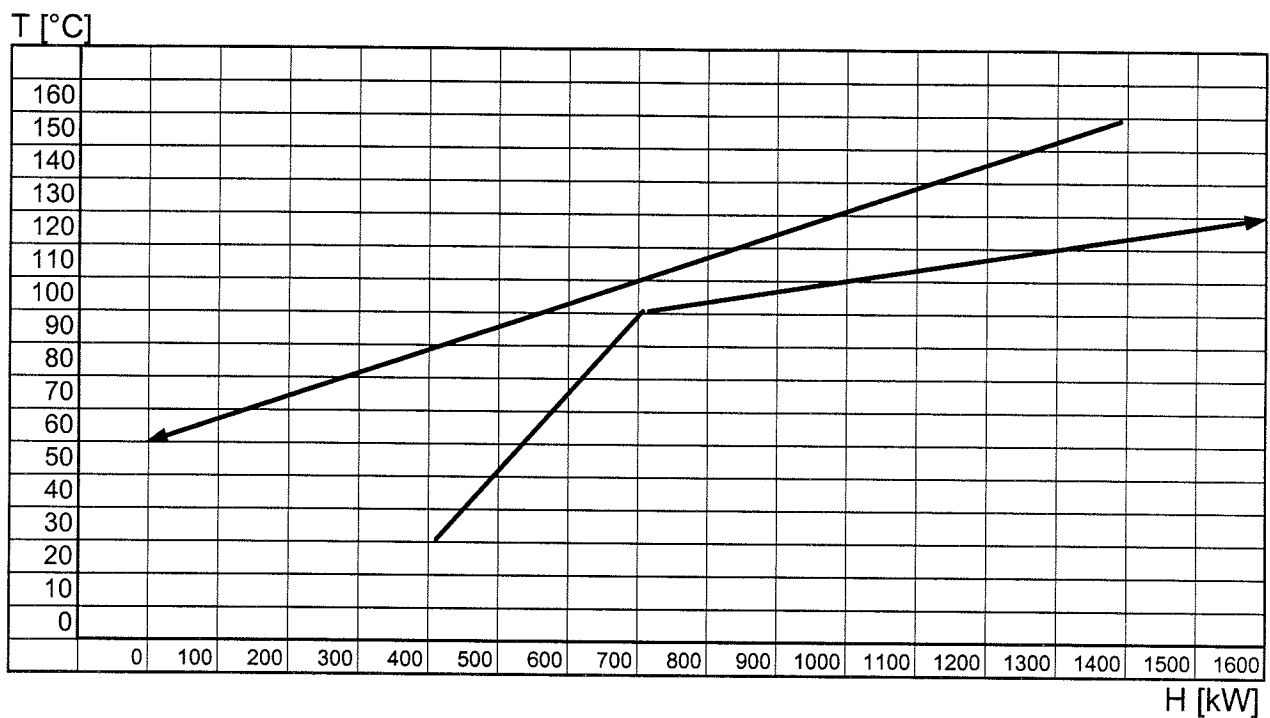
Übung Netzwerkerstellung Kap. 7



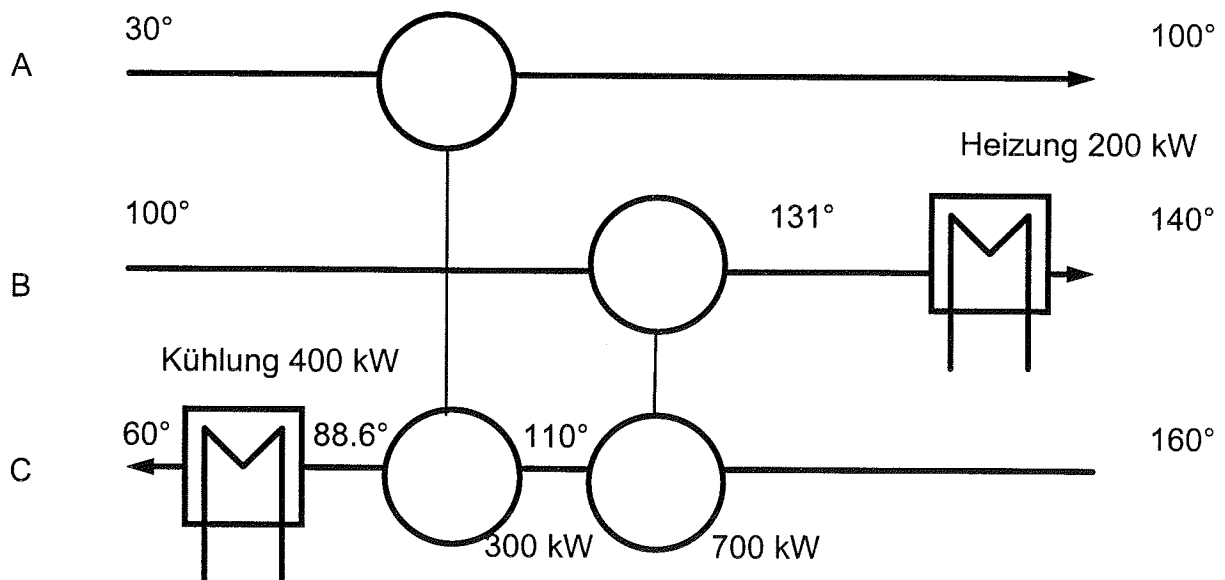
Lösung zur Übung Zielwertfindung 1 Kap.6, Netzwerkerstellung Kap.7

Prozessanforderungen und Verbundkurve

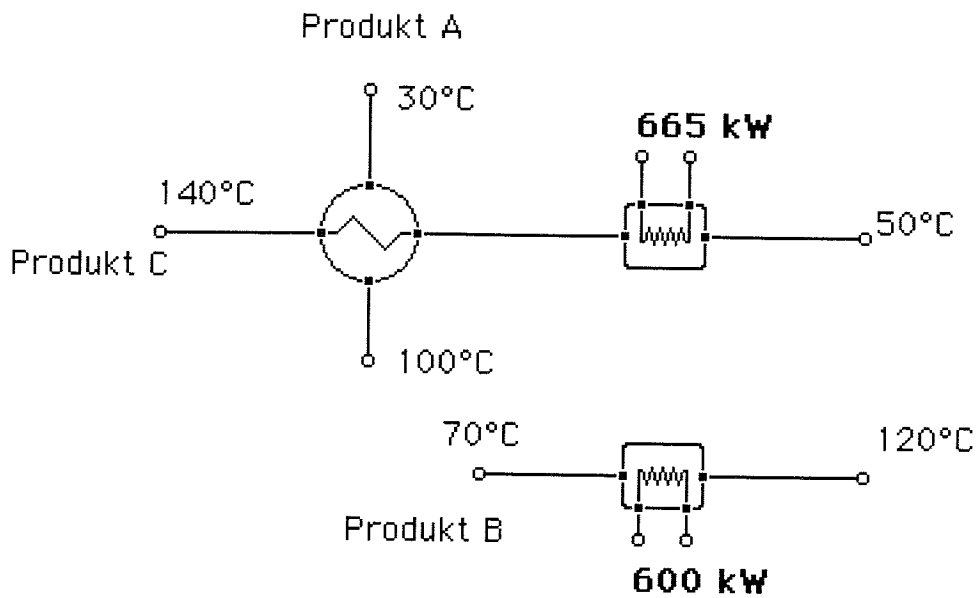
	\dot{m} kg/s	c_p kJ/kgK	CP kW/K	T_A °C	T_E °C	\dot{Q} kW
Prod A	1.07	4,0	4.286	30	100	- 300
Prod B	5,625	4,0	22,5	100	140	- 900
Prod C	10	1,4	14,0	160	60	1400



Minimale Temperaturdifferenz: $\Delta T = 10$ K



Uebung Zielwertfindung 2



Gegeben:

Energie- und Massenbilanz des Systems resp. Prozessanforderungen (siehe folgende Seite)

Aufgaben:

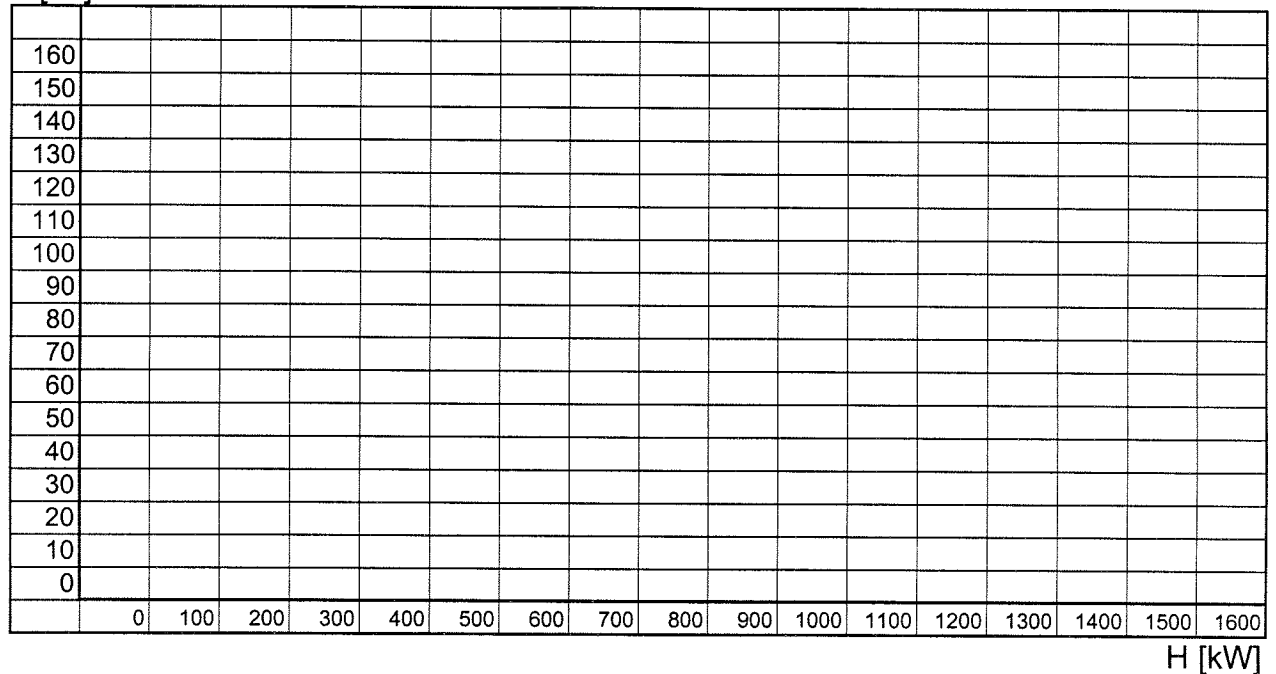
- Konstruieren Sie die Verbundkurven für ein ΔT_{\min} von 10 K.
- Bestimmen Sie die notwendigen Heiz- und Kühlleistungen

Übung Zielwertfindung 2

Energie- und Massenbilanz / Prozessanforderungen

	\dot{m} kg/s	c_p kJ/kgK	CP kW/K	T_A °C	T_E °C	\dot{Q} kW
Prod A	1.0	4.0	4.0	30	100	- 280
Prod B	3.0	4.0	12.0	70	120	- 600
Prod C	7.5	1.4	10.5	140	50	945

T [°C]



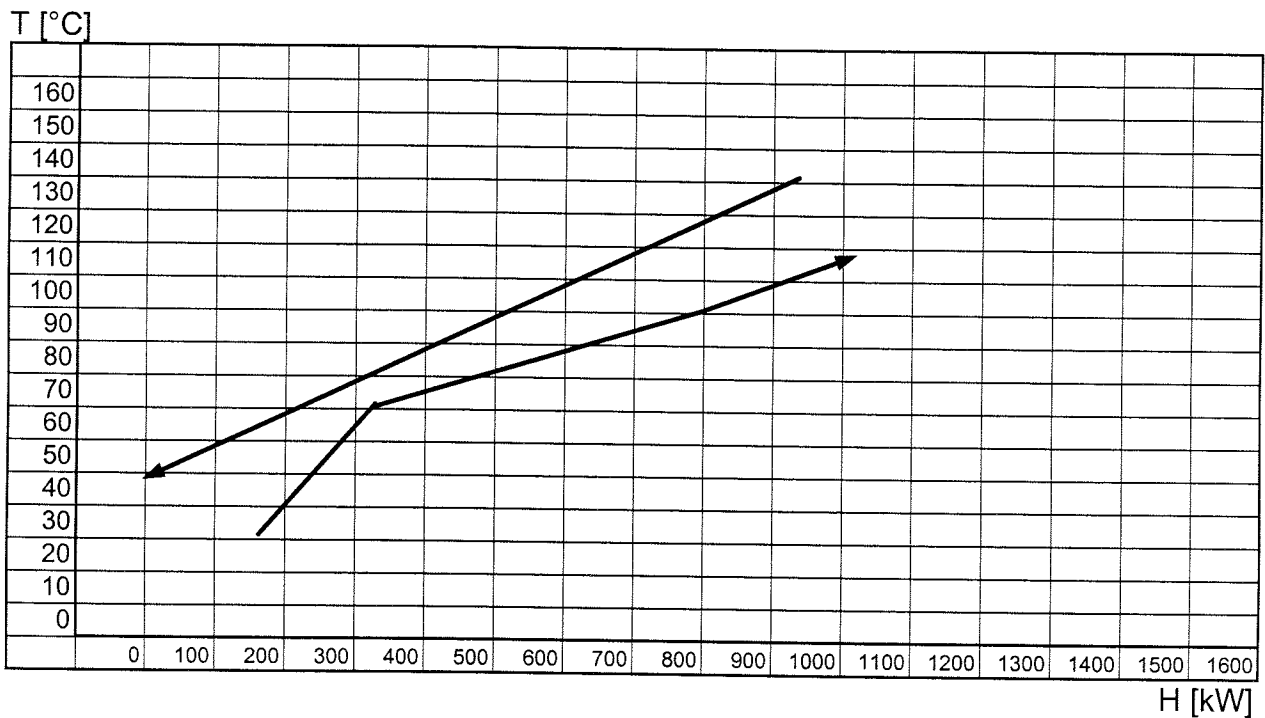
H [kW]

Minimale Temperaturdifferenz: $\Delta T = 10$ K

Lösung zur Übung Zielwertfindung 2

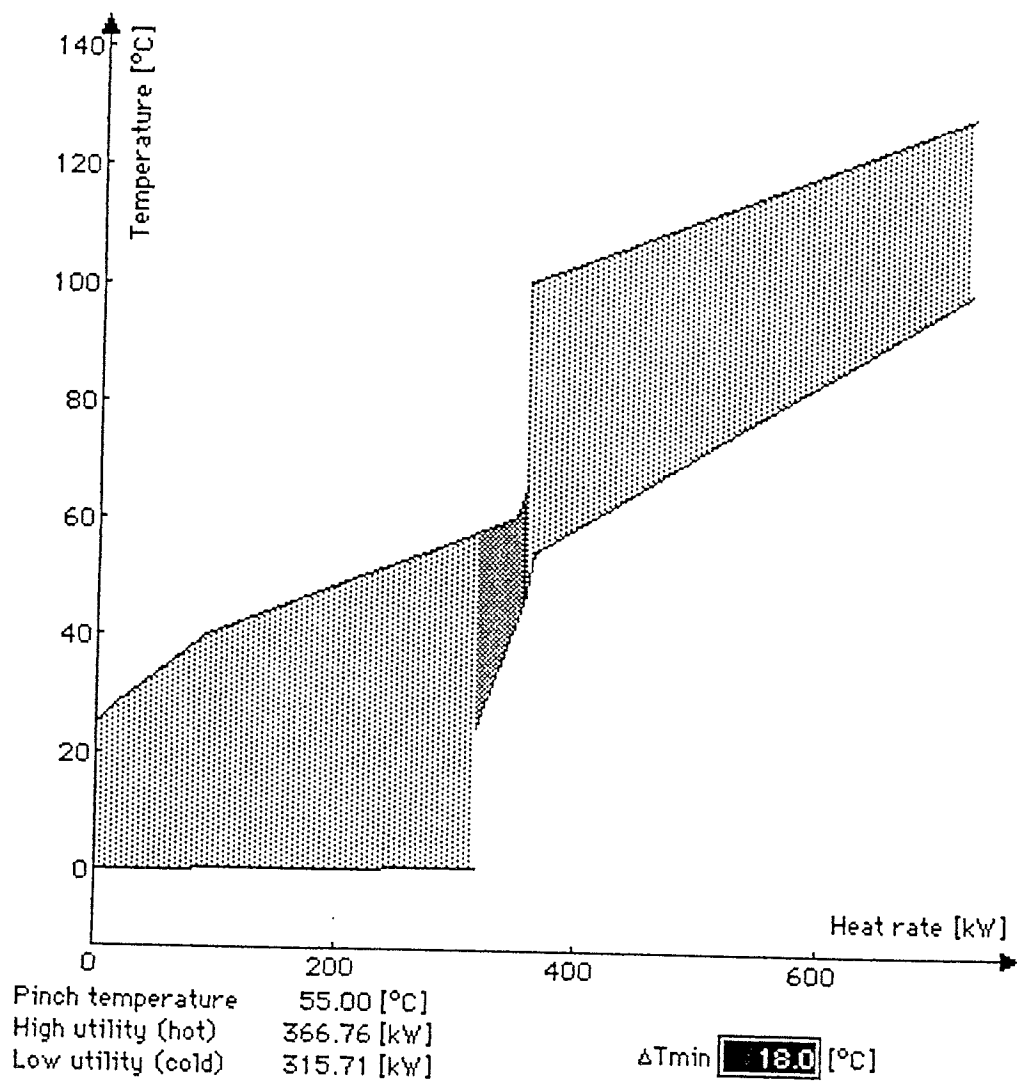
Prozessanforderungen

	\dot{m} kg/s	c_p kJ/kgK	CP kW/K	T_A °C	T_E °C	\dot{Q} kW
Prod A	1.0	4.0	4.0	30	100	- 280
Prod B	3.0	4.0	12.0	70	120	- 600
Prod C	7.5	1.4	10.5	140	50	945

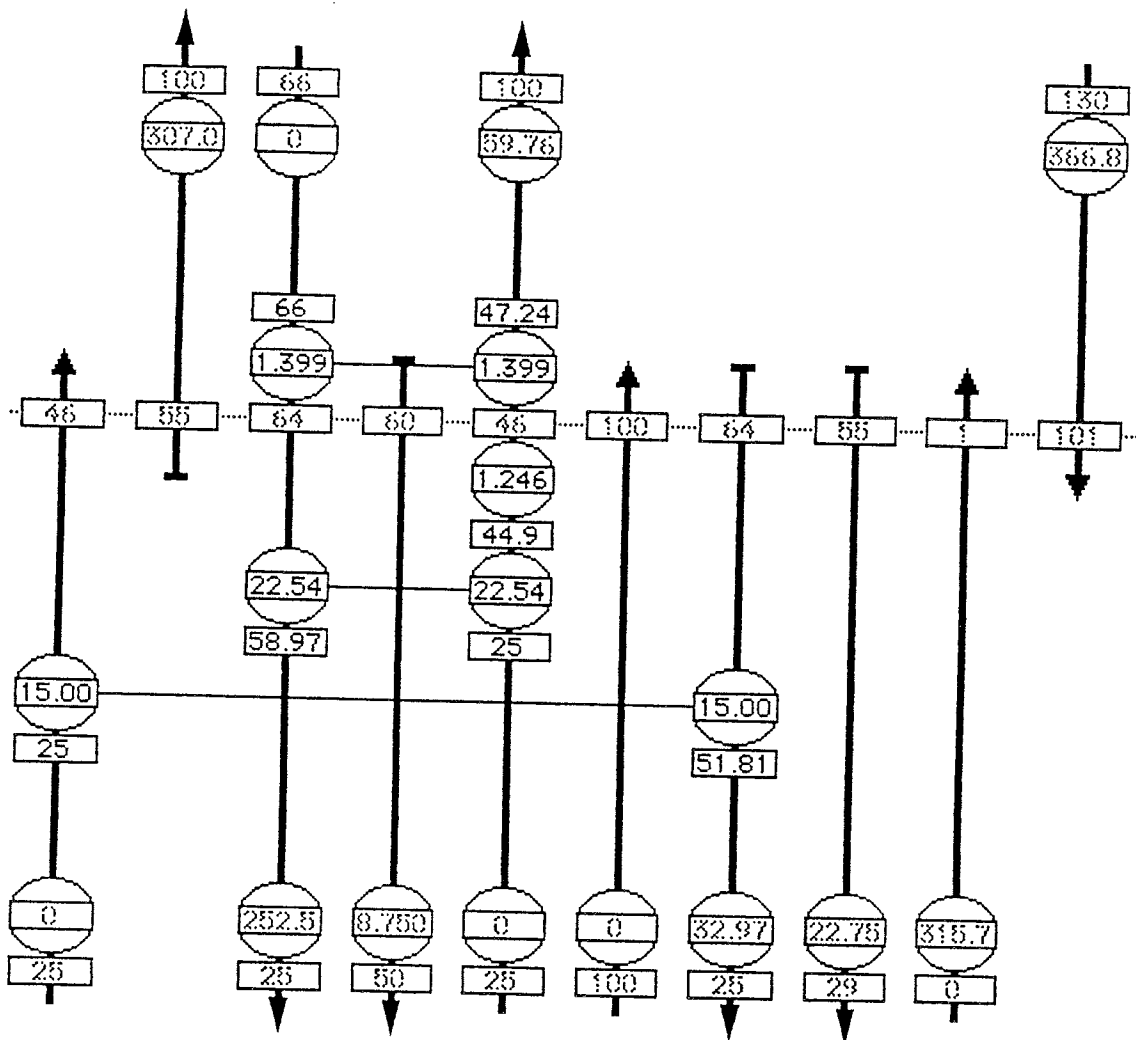


Minimale Temperaturdifferenz: $\Delta T = 10$ K

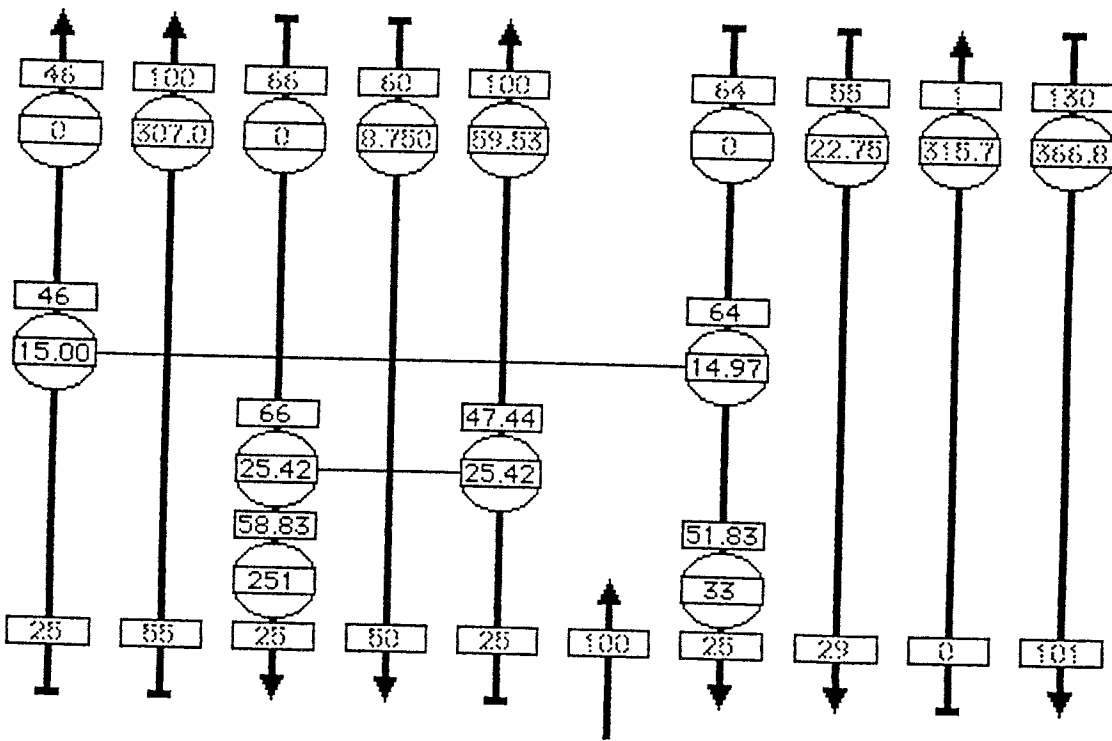
Verbundkurve



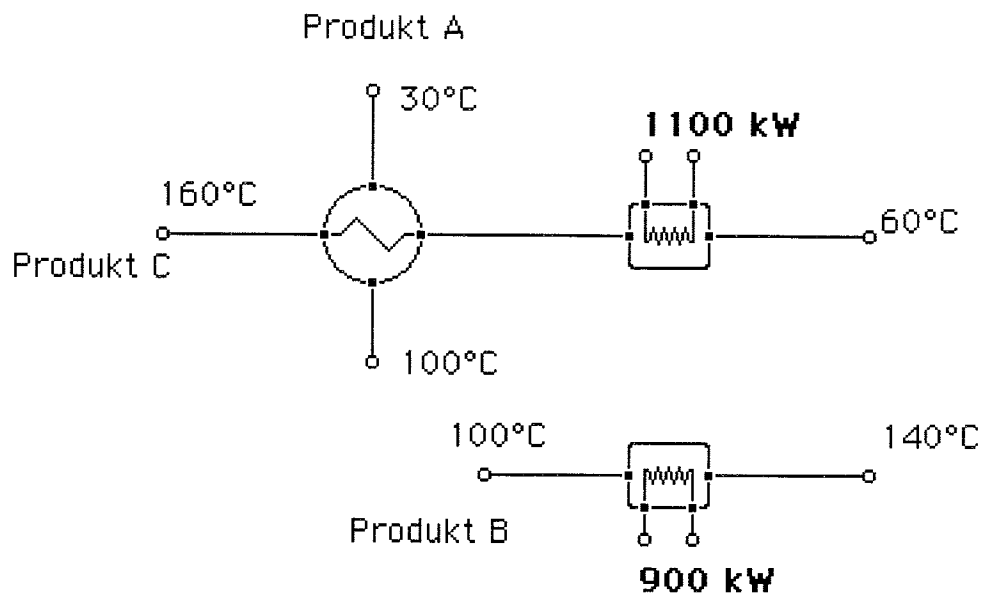
Lösung MER-Netzwerk



Lösung Optimales Netzwerk

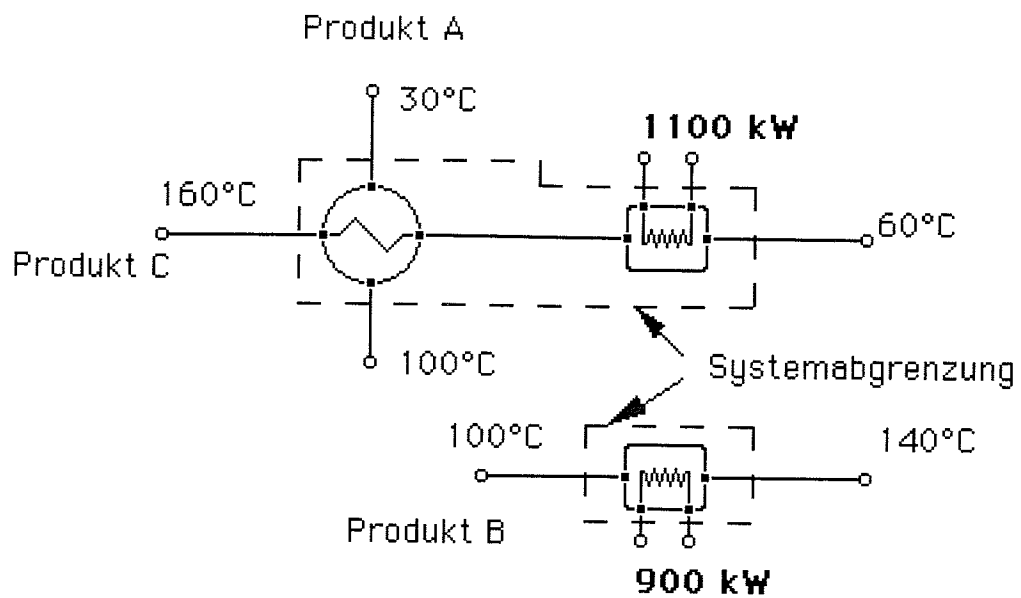


Übung Systeme und Bilanzen



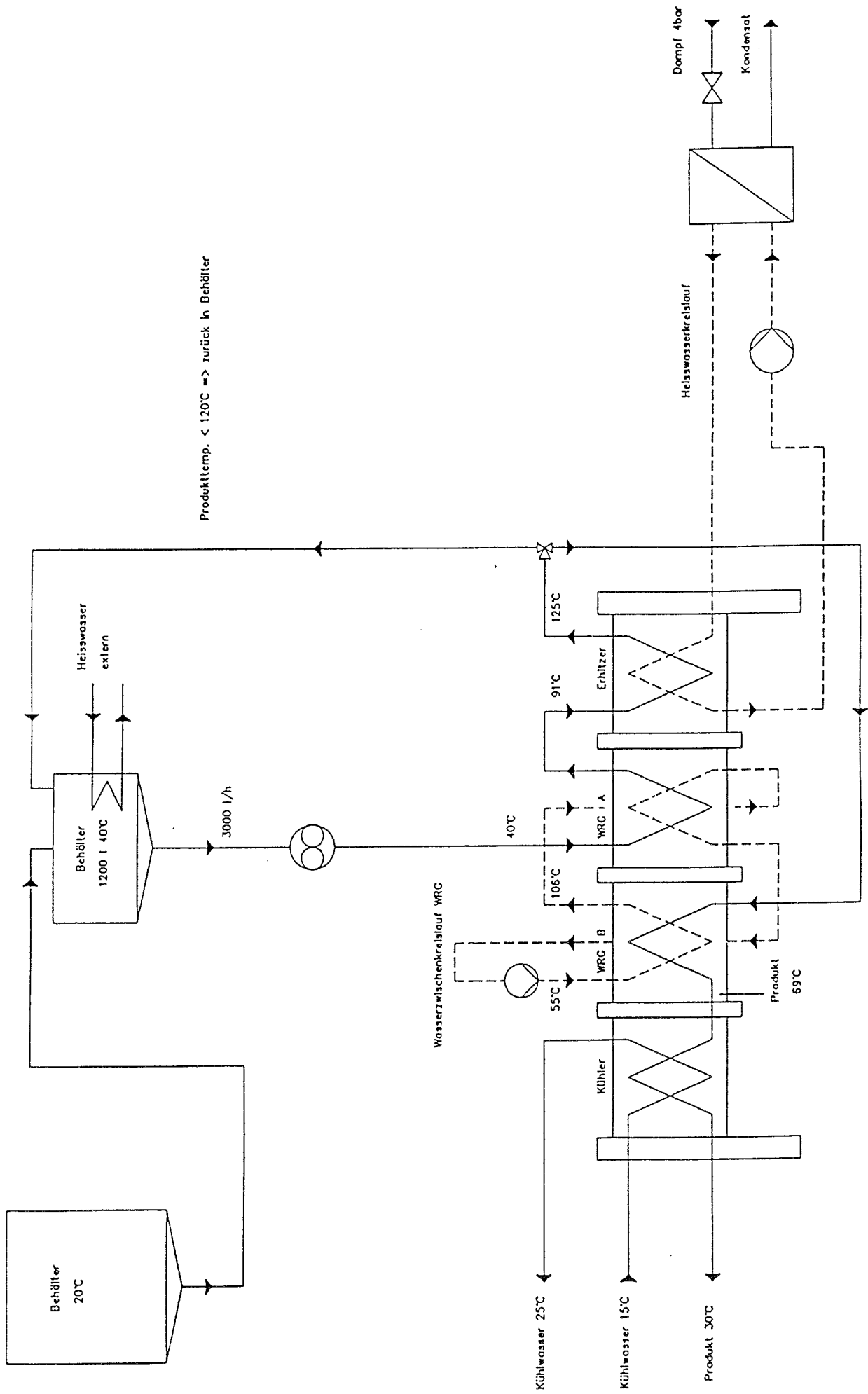
	\dot{m} kg/s	c_p kJ/kgK	CP kW/K	T_A °C	T_E °C	\dot{Q} kW
Prod A						
Prod B						
Prod C						

Lösung zur Übung Systeme und Bilanzen



Prozessanforderungen

	\dot{m} kg/s	c_p kJ/kgK	CP kW/K	T_A °C	T_E °C	\dot{Q} kW
Prod A	1.07	4,0	4.286	30	100	- 300
Prod B	5,625	4,0	22,5	100	140	- 900
Prod C	10	1,4	14,0	160	60	1400



Anhang Blatt A12	Pasteur ist			
	Datum 25.04.94	Gez DIG	Kontroll MOR	Massstab Plan 1:1
helbling Ingenieurunternehmung Energie-, Anlagen- und Bauplanung CH-9018 Zuerich, Hohlstrasse 810, Telefon 01 4376864	Gezeichnet A4	Blatt V6	8264-04	

Prozessanforderungen

Tin [°C]	Tout [°C]	Mflow [kg/s]	cp [kJ/kgK]	Leistung [kW]	Art
20	120	1.125	2.7	-303	Produkt
120	25	1.125	2.7	289	Produkt
124	119	util	4		Heisswasser
12	24.9	util	4		Kühlwasser

ÖFFENTLICHE ENERGIEBERATUNGSSTELLEN / Service d'information en matière d'énergie S.I.E.

NIDWALDEN

Baudirektion Nidwalden
Energiefachstelle
Beat Wyrmann
Breitenhaus
6370 Stans
☎ 041/618 72 11
☎ 041/618 72 25

OBWALDEN

Tiefbauamt Obwalden
Abt. Wasserkraft und Energie
Karl Flury
Dorplatz 4
6060 Sarnen
☎ 041/666 63 63
☎ 041/660 71 91

ST. GALLEN

St. Galler Stadtwerke
Kunden-Center
Schützengasse 4
9000 St. Gallen
☎ 071/224 58 23
☎ 071/224 58 19

Technische Betriebe Gossau

Energieberatungsstelle
Emil Biser
Bischofzellerstr. 90
9200 Gossau
☎ 071/388 47 47
☎ 071/385 49 58

Energiefachstelle der Stadt Wil

Sacha Derron
Rathaus
9500 Wil
071/913 53 18
071/913 53 54

Energieberatung übriges Kantonsgebiet

INFOENERGIE Beratungszentrale
c/o Nova Energie, FAT
8356 Tänikon b. Aadorf
☎ 052/368 34 85
☎ 052/368 34 89

SCHAFFHAUSEN

Energiefachstelle Kanton SH
Hochbauamt
Roland Emhardt
Beckenstube 11
8200 Schaffhausen
☎ 052/632 73 88
☎ 052/624 77 24

Energieberatertelefon des Kantons Schaffhausen

Beckenstube 11
8200 Schaffhausen
☎ 052/624 77 24
Pers. Beratung Di/Do 14-17 Uhr

SOLOTHURN

Energieberatungsstelle
Region Grenchen
Armin Meier
Bahnhofstrasse 33
2540 Grenchen
☎ 032/653 04 02
☎ 032/653 04 04

Energieberatung Dorneck

Thierstein
Rudolf Bozizi
Bridlachstr. 5
4226 Breitenbach
☎ 061/781 25 53
☎ 061/415 46 71

Energie- und Umweltberatung äusseres Wasseramt

Martin Messerli
Hauptstrasse 39
4552 Derendingen
☎ 032/682 20 63
Do 16-19 Uhr

Energieberatung Solothurn und Umgebung

Hans Eisenhut
Westbahnhofstrasse 3
4502 Solothurn
☎ 032/624 84 65
☎ 032/624 88 00

Energieberatung Olten – Trimbach

Stadthaus
Postfach
4603 Olten
☎ 062/206 12 61
☎ 062/206 13 71

SCHWYZ

Energieberater Küssnacht EBK
Iso Wyrsch
Lindenweg 11, Postfach 103
6403 Küssnacht am Rigi
☎ 041/850 51 91
☎ 041/850 51 04

Hochbauamt Kanton Schwyz Energiefachstelle

Beat Voser
Steigstrasse 3
6430 Schwyz
☎ 041/819 25 24
☎ 041/819 25 29

Energieberaterverein der Region Schwyz-Gersau EBS

Hans-Peter Hauri
c/o Hauri Energietechnik
Postfach 116
6431 Schwyz
☎ 041/811 81 44
☎ 041/811 81 93

Verein für Energiefragen Region Einsiedeln VERE

Sekretariat Bezirksverwaltung
Postfach 161
8840 Einsiedeln
☎ 055/418 41 91
☎ 055/418 41 92

Verein für Energieberatung

March-Höfe EMH
c/o Gemeindeverwaltung
Umweltschutzstelle
Alter Schulhausplatz 1
8853 Lachen SZ
☎ 055/442 42 22
☎ 055/442 29 00

THURGAU

**Energieberatungsstelle
Hinterthurgau/Aadorf**
INFOENERGIE Beratungszentrale
c/o Nova Energie, FAT
8356 Tänikon b. Aadorf
☎ 052/368 34 85
☎ 052/368 34 89

Energieberatungsstelle Frauenfeld

Region Frauenfeld
Josef Kessler
Postfach
8501 Frauenfeld
☎ 052/724 52 85
☎ 052/721 92 82

Energieberatungsstelle der Gemeinde Weinfelden

Paul Roth
Rathaus Bauamt
Rathausstrasse 2
8570 Weinfelden
☎ 071/622 49 22
☎ 071/622 33 91

Energieberatungsstelle der Gemeinde Amriswil

Rolf Scheurer
Bauverwaltung
Arbonerstrasse 2
8580 Amriswil
☎ 071/414 11 12
☎ 071/414 12 45

Energieberatungsstelle Region Arbon

Peter Binkert
Bauverwaltung, Stadthaus
Hauptstrasse 12
9320 Arbon
☎ 071/447 61 72
☎ 071/446 28 27

Energieberatungsstelle der Gemeinde Romanshorn

Hansjörg Stibi
Bauverwaltung
Bankstrasse 6
8590 Romanshorn
☎ 071/463 31 82
☎ 071/461 15 41

Energieberatungsstelle übriges Kantonsgebiet

INFOENERGIE-Telefon
☎ 052/721 13 21

TESSIN

**Ufficio risparmio energetico
sez. prot. dell'aria e acqua**
Mario Briccola
c/o Dip. del territorio
Palazzo Amministrativo 2
6501 Bellinzona
☎ 091/804 37 33
☎ 091/804 37 36

INFOENERGIA Ticino

Centrale di consulenza
Aldaro Perozzi
Dip. del territorio
6501 Bellinzona
☎ 091/804 37 55
☎ 091/804 37 36

URI

Amt für Energie Uri
Gerhard Danioth
Klausenstrasse 2
6460 Altdorf
☎ 041/875 26 23
☎ 041/875 26 10

VAUD

Centre cantonal INFOENERGIE
10, Rue du Valentin
1014 Lausanne
☎ 021/316 70 16
☎ 021/316 70 36

VALAIS

**CREM Centre de Recherches
Énergétiques et Municipales**
Stéphane Storelli
Rue des Morasses 5
1920 Martigny
☎ 027/721 25 40
☎ 027/722 99 77

Service de l'énergie

7, Av. du Midi
1950 Sion
☎ 027/606 31 00
☎ 027/606 30 04

Energieberatungsstelle der Region Goms

Christian Imhof
3995 Ernen
☎ 027/971 17 30
☎ 027/971 17 66

ZUG

**Vereinigung Zuger
Energieberater VZE**
c/o Gilbert L. Chapuis
Weinbergstrasse 34
6300 Zug
☎ 041/710 29 10
☎ 041/710 01 40

ZÜRICH

Zürcher Energieberatung
Beatenplatz 2, Postfach 6928
8023 Zürich
pers. Beratung Mo -Fr, 13-18 Uhr
Vorankmeldung erwünscht unter
☎ 01/212 24 24
☎ 01/212 19 30

Forum – Energie - Zürich

Geschäftsstelle
Leutschenbachstr. 45
8050 Zürich
Telefondienst für Gratisauskünfte
☎ 01/251 20 20

Energieberatungsstelle Stadt Winterthur

Stadtverwaltung Winterthur
Technikumstr. 81
8402 Winterthur
☎ 052/267 54 50
☎ 052/267 62 63

Stand: 4.10.1999

ÖFFENTLICHE ENERGIEBERATUNGSSTELLEN / Service d'information en matière d'énergie S.I.E.

AAARGAU

Energieberatungsstelle
Untersiggenthal
Pius Murrmann
Bauverwaltung
5417 Untersiggenthal
☎ 056/298 03 05
☎ 056/298 02 23

☎ 061/853 18 02 oder 061/831 40 60
☎ 061/853 18 03

APPENZEL A.

Reg. Energieberatungsstelle
Regionalzentrum Kusterel
Thutplatz, Postfach 93
4800 Zofingen
☎ 062/752 36 02
☎ 062/723 39 46

INFOENERGIE

Beratungszentrale Nordwestschweiz
Schachenallee 29
5000 Aarau
☎ 062/834 03 03
☎ 062/834 03 23

KÜTTIGEN

Bruno Schubert
Gemeindekanzlei
5024 Küttigen
☎ 062/839 93 40

InfoEnergie

Beratungsstelle Suhren-und Wynental
Thomas Scheuzger
Postfach
5040 Schöffland
☎ 062/721 50 12
☎ 062/721 50 47

Energieberatungsstelle

Oberes Fricktal
Urs Zehnder
Gemeindehaus
5070 Frick
☎ 062/871 55 02
☎ 062/834 21 45

Energieberatungsstelle

Region Baden-Wettingen
Heinz Imholz
Ehendingerstr. 42
5408 Ennetbaden
☎ 056/222 86 03
☎ 056/222 06 42

Öffentl. Energieberatungsstelle

Aarest und Klesental
Ernst Thomann
Säggasse 2, Postfach 1353
3110 Münsingen
☎ 031/721 58 27

Energieberatungsstelle

Schwarzwasser
Bruno Rankwiler
Allmend
3155 Helgisried
☎ 031/809 22 44

Energieberatungsstelle Oberes

Emmental
Daniel Sutter
Burgdorfstr. 7
3550 Langnau
☎ 034/402 24 94

Energieberatungsstelle

Thun/Innertport, Gürbe- und Kandertal
Urs Neuenschwander /
Markus Hännli
Scheibenstr. 9, Postfach 1085
3601 Thun
☎ 033/225 85 03
☎ 033/225 85 38

Energieberatungsstelle

Saaneland
Otto Rychener
Bauverwaltung
3792 Saanen
☎ 033/748 92 04
☎ 033/748 92 61

Energieberatungsstelle

Oberland Ost
Peter Michel
Oberdorfstr. 4
3855 Brienz
☎ 033/951 37 77
☎ 033/951 41 61

Energieberatungsstelle

Oberaargau
Daniel Starkermann
Waldhoferstrasse 1
4900 Langenthal/BE
☎ 062/923 22 21
☎ 062/923 63 41

BASEL-LANDSCHAF

Energieberatung Münchenstein
Elektra Birseck
Weidenstrasse 27
4142 Münchenstein
☎ 061/415 45 47
☎ 061/415 46 71

Elektra Baselland

Energieberatungsstelle
Ernst Gasser
Mühlemattstr. 6
4410 Liestal
☎ 061/926 11 11
☎ 061/921 15 82

BASEL-STÄDT

Energieberatungsstelle IWB
Bruno Saner
Steinenvorstadt 14, Postfach
4008 Basel
☎ 061/275 51 78
☎ 061/275 51 77

F. LIECHTENSTEIN

Energiefachstelle FL
Amt für Volkswirtschaft
Edmund Sele
Kirchstrasse 7
9490 Vaduz
☎ 075/236 68 93
☎ 075/236 68 89

FRIBOURG

Service d'information sur les économies d'énergie
Maurice Egger
Direction de l'Éclité
7, Rue Joseph-Piller
1700 Fribourg
☎ 026/351 75 22

Département des transports

Section énergie
Serge Boschung
13, rue Joseph-Piller, CP
1701 Fribourg
☎ 026/305 28 43
☎ 026/305 28 48

Energieberatungsstelle

Düdingen
Arnold Zurkinden
Gemeindebauamt
3186 Düdingen
☎ 026/492 74 45
☎ 026/492 74 00

Energieberatung Murten

Industrielle Betriebe
Rathausgasse 8
3280 Murten
☎ 026/672 63 00
☎ 026/672 63 99

GENEVE

Office cantonal de l'énergie
Centre d'information sur l'énergie
Case postale 3918
1211 Genève 3
☎ 022/319 23 23
☎ 022/319 20 94

GLARUS

Energieberatungsstelle Glarnerland
Otto Fischli
Hauptstrasse 51, Postfach 917
8750 Glarus
☎ 055/646 64 77
☎ 055/640 84 09

Energiefachstelle Glarus

Jakob Kubli
Kantonale Baudirektion
8750 Glarus
☎ 055/646 64 32
☎ 055/646 64 99

GRAUBÜNDEN

Amt für Energie Graubünden
Andrea Lötischer
Rohaanstr. 5
7001 Chur
☎ 081/257 36 24
☎ 081/257 20 31

Verband Ostschweizer

Bau- + Energie-Fachleute
VOBE
Postfach 685
7002 Chur
☎ 079/611 32 36

JURA

Service des transports et de l'énergie
Franis Jeannotat
2, rue des Moulins
2800 Delémont
☎ 032/420 53 90
☎ 032/420 53 91

LUZERN

Luzerner Beratungsstelle für Energiefragen LUBEF
Postfach 3069
6002 Luzern
☎ 041/319 93 02

INFOENERGIE

Beratungszentrale Zentralschweiz
c/o Georg Furler
Weissenbrunnstrasse 41
8903 Birmensdorf
☎ 01/737 14 45
☎ 01/737 03 17

NEUCHÂTEL

Service de l'urbanisme de la Ville de Neuchâtel
Christian Trachsel
Faubourg du Lac 3
2001 Neuchâtel
☎ 032/717 76 60
☎ 032/717 76 69

Service de l'énergie

Maurice Grünig
Rue du Collège 31d
2300 La Chaux-de-Fonds
☎ 032/967 66 77/78
☎ 032/967 66 89

Service cantonal de l'énergie et centre info-énergie

Marc Tillmanns
Rue de Tivoli 16
2000 Neuchâtel
☎ 032/889 67 26
☎ 032/889 60 60

