



Schlußbericht

Wärmeintegration bei "Batch"-Prozessen

AiF-Vorhaben-Nr. 10924 N

**Institut für Umwelttechnologie und
Umweltanalytik e.V., Duisburg
Abteilung Thermodynamik: Prof. Dr.-Ing. K. Lucas**

April 1998

Institut für Umwelttechnologie
und Umweltanalytik e.V.
Bliersheimer Straße 60, 47229 Duisburg

Name der Forschungsstelle

10924 N / III

Aif-Vorhaben-Nr. / GAG

01.11.1996 bis 31.01.1998

Bewilligungszeitraum

Schlußbericht für den Zeitraum: 01.11.1996 bis 31.01.1998

Forschungsthema: Wärmeintegration bei "Batch"-Prozessen

Duisburg, 23.04.1998

Ort, Datum



Unterschrift des Projektleiters

Dokumentationsblatt

Verein zur Förderung der Umwelt-
technologie und Umweltanalytik e.V.
c/o IUTA, Bliersheimer Str. 60,
47229 Duisburg

AiF-Mitgliedsvereinigung (MV)

Wirtschaftszweig (WZ)

Aktenzeichen der MV

10924 N / III

AiF- Vorhaben-Nr. / GAG

01.11.1996 bis 31.01.1998

Bewilligungszeitraum

167.800,- DM

Gesamtzuwendung

Forschungsstelle(n) : Institut für Umwelttechnologie und
Umweltanalytik e.V. (IUTA)
Bliersheimer Straße 60
47229 Duisburg

Forschungsthema : Wärmeintegration bei "Batch"-Prozessen

Erzielte Ergebnisse und deren Anwendungsmöglichkeiten :

siehe Anlage

Anlage zum Dokumentationsblatt (Formular 4.1.19)

Forschungsthema: Wärmeintegration bei "Batch-Prozessen"

AiF-Vorhaben-Nr.: 10924 N

Erzielte Ergebnisse und deren Anwendungsmöglichkeiten

Forschungsziel war die wissenschaftliche Erforschung der Wärmeintegration bei "Batch"-Prozessen und ihre Analyse durch eine systematische, computergestützte Methode. Ausgehend von der thermodynamischen Pinch-Methode und dem algorithmischen OMNIUM-Verfahrens wurde ein neues Verfahren zur Wärmeintegration bei "Batch"-Prozessen entwickelt. Dabei dient die Pinch-Methode zur Bereitstellung von Energiezielen, insbesondere der exergetischen Qualität des Netzwerkes maximaler Wärmeintegration. Das OMNIUM-Verfahren bietet den Vorteil einer einfachen Algorithmisierung und der Erstellung von Netzwerken. Es werden allerdings energetisch suboptimale Lösungen erzeugt.

Das neue Verfahren basiert auf den Algorithmen des OMNIUM-Verfahrens, weist aber zwei entscheidende Modifikation auf. Einerseits ist nun eine rekursive Anwendung möglich. Dadurch wird die Schwäche des OMNIUM-Verfahrens, daß jeder Stoffstrom maximal einmal verschaltet werden kann, eliminiert. Andererseits wurde ein als "Parallelisierung" bezeichneter Algorithmus entwickelt, der zu einer Minimierung der Exergieverluste führt. Das neue Verfahren erlaubt die sukzessive Entwicklung des Netzwerkes mit einer exergetischen Güte entsprechend dem vorgegebenen Energieziel gemäß der Pinch-Methode. Durch Eliminierung der Variablen Zeit wurde weiterhin die Einbindung von Wärmespeichern möglich.

Ein entsprechendes Computerprogramm wurde erstellt. Dieses prüft nach der Berechnung der maximal mit Wärmeübertragern bzw. Speichern übertragbaren Wärmemenge den Einsatz von Wärmepumpen. Ist die Verschaltung zweier Stoffströme durch eine Wärmepumpe sinnvoll, werden zur Dimensionierung notwendigen Daten berechnet. Die Sinnfälligkeit einer Wärmepumpe ist dann gegeben, wenn die Leistungsziffer der Verschaltung oberhalb einer vorgegebenen Leistungsziffer liegt.

Das Verfahren wurde auf Modellprozesse angewendet. Dabei wurde die Qualität der erreichbaren Netzwerke einer statistischen Bewertung unterzogen. Die Güte der Wärmeintegration, die mit dem neuen Verfahren erreichbar ist, wurde an 1.000 - mittels Zufallsgenerator erzeugten - Modellprozessen überprüft. Es zeigte sich, daß das Netzwerk maximaler exergetischer Güte mit dem neuen Verfahren entwickelt wird. Da dieses Netzwerk sukzessiv entwickelt wird, ist es jederzeit möglich, die Netzwerkentwicklung an dem Punkt zu unterbrechen, an dem eine Steigerung der

Wärmerückgewinnung nur mit einer unverhältnismäßig großen Steigerung der Komplexität des Netzwerkes einhergeht. Neben der Anwendung auf Modellprozesse wurde mit dem Verfahren die Wärmeintegration für einen Prozeß aus der Milchwirtschaft durchgeführt.

"Batch"-Prozesse laufen typischerweise bei kleinen Produktionsmengen, also insbesondere in kleinen und mittleren Unternehmen, ab. Beispiel sind die Lebensmittelindustrie, die Textilindustrie, die chemische Industrie u. a. Das entwickelte Verfahren zur Wärmeintegration bei "Batch"-Prozessen ist daher insbesondere von diesem Unternehmenskreis anzuwenden und auch wirtschaftlich zu nutzen. Darüber hinaus ist die zu entwickelnde Methode für die Hersteller der einschlägigen Komponenten wie Wärmeübertrager und Wärmespeicher sowie für Energieberatungsunternehmen zur Unterstützung bei der Auslegung von Systemen interessant. Generell ist daher dieses Instrument zur Förderung der rationellen Energienutzung im dezentralen Bereich von allgemeiner Bedeutung.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens werden demnächst in Fachzeitschriften veröffentlicht. Teilergebnisse wurden im "Tätigkeitsbericht 1996" und im "Tätigkeitsbericht 1997" (in Vorbereitung) des IUTA bereits dargestellt.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschung "Otto von Guericke" e.V. - AiF gefördert.

Fragebogen zur Einschätzung der erzielten Forschungsergebnisse

- | | ja | zum Teil | nein | |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1. Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 2. Die Ergebnisse sind vorwiegend : | | | | |
| 2.1 grundlagenorientiert | <input type="checkbox"/> | | | |
| 2.2 produktorientiert | <input type="checkbox"/> | | | |
| 2.3 verfahrensorientiert | <input checked="" type="checkbox"/> | | | |
| 3. Die Ergebnisse liefern einen Beitrag | | | | |
| 3.1 zu einem neuen Produkt | <input type="checkbox"/> | | | |
| 3.2 zu einem neuen Verfahren | <input checked="" type="checkbox"/> | | | |
| 3.3 zur produktbegleitenden FuE | <input type="checkbox"/> | | | |
| 3.4 zur verfahrensbegleitenden FuE | <input type="checkbox"/> | | | |
| 4. Die Bedeutung der Ergebnisse ist folgendermaßen einzuschätzen : | hoch | mittel | gering | z.Zt. nicht absehbar |
| 4.1 wissenschaftlich | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 4.2 wirtschaftlich in Bezug auf Anwendungsmöglichkeiten in kmU | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 5. Eine industrielle Anwendung der Ergebnisse ist realisiert | ja | demnächst | nein | z.Zt. nicht absehbar |
| | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 6. Eine weiterführende FuE kann in < 3 Jahren zur Innovation (z.B. Pilotanwendung) führen | ja | vielleicht | nein | z.Zt. nicht absehbar |
| | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 7. Die Ergebnisse sind folgenden Fachgebieten zuzuordnen : | | | | - siehe Anlage 1 - |
| 8. Die Ergebnisse werden in folgenden Wirtschaftszweigen genutzt : | | | | - siehe Anlage 2 - |
| | ja | nein | | |
| 9. Die Ergebnisse wurden im Internet veröffentlicht | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | | |
| 10. Ich bin mit einer Veröffentlichung der Ergebnisse durch die AiF im Internet einverstanden | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | |

Duisburg, 23.04.1998

Ort, Datum

K. G. Schmidt

Institut für Umwelttechnologie
 und Umweltanalytik e.V.

Institut an der Universität - GH - Duisburg

Unterschrift des Leiters und Stempelabdruck

der Forschungsstelle

- Letztzuwendungsempfänger -

Zuordnung der erzielten Forschungsergebnisse zu Fachgebieten

(Anlage 1 zum Fragebogen zur Einschätzung der erzielten Forschungsergebnisse)

Fachgebiete	Hauptsächliche Nutzung	Anwendung auch möglich
1. Rohstoffe		
2. Werkstoffe, Materialien		
3. Chemie	X	
4. Verfahrenstechnik	X	
5. Lebensmittel-, Bio-, Gentechnik	X	
6. Mikrobiologie, Hygiene		
7. Umwelttechnik	X	
8. Konstruktion		
9. Produktion		
10. Elektrotechnik, Mikrosystemtechnik Medizintechnik		
11. Meß-, Regel-, Automatisierungstechnik		
12. Informations- und Kommunikationstechnik		
13. Betriebswirtschaft, Organisation		

Einordnung der erzielten Forschungsergebnisse in Wirtschaftszweige

(Anlage 2 zum Fragebogen zur Einschätzung der erzielten Forschungsergebnisse)

Wirtschaftszweige	Hauptsächliche Nutzung	Anwendung auch möglich
Kohlenbergbau und Torfgewinnung		
Ernährungsgewerbe	X	
Textil- und Bekleidungsgewerbe	X	
Ledergewerbe		
Holzgewerbe		
Papier-, Verlags- und Druckgewerbe		X
Kokerei, Mineralölverarbeitung, Spalt- und Brutstoffe		X
Chemische Industrie	X	
Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren		
Glasgewerbe, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden		X
Metallerzeugung und -bearbeitung, Herstellung von Metallerzeugnissen		
Maschinenbau		
Büromaschinen, Datenverarbeitungsgeräte, Elektrotechnik, Feinmechanik und Optik		
Fahrzeugbau		
Möbel, Schmuck, Musikinstrumente, Sportgeräte und sonstige Erzeugnisse		
Energie- und Wasserversorgung	X	
Baugewerbe		
Landverkehr, Transport		
Erbringung von Dienstleistungen überwiegend für Unternehmen	X	

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Modellierung von <i>Batch</i>-Prozessen	4
2.1	Reale <i>Batch</i> -Prozesse	4
2.1.1	Betrieblicher Ablauf	5
2.1.2	Möglichkeiten der Wärmeintegration	6
2.2	Transformation auf die T, \dot{H} -Ebene	6
2.3	Rücktransformation auf reale Prozesse	10
2.4	Modellbeispiele	12
3	Grundlegende Verfahren zur Wärmeintegration	14
3.1	Überblick	14
3.2	Pinch-Methode	16
3.3	OMNIUM-Verfahren	23
4	Methodenentwicklung	25
4.1	Restwärmepotential	28
4.2	Verschaltungsmöglichkeiten zweier Ströme	29
4.2.1	Übertragung maximaler Wärme	29
4.2.2	Parallelisierung	32

4.2.3	Restwärmeströme	35
4.2.4	Programm-Ablauf	37
4.3	Bewertung der Verfahren	37
4.3.1	Statistische Auswertung	38
4.3.2	Anwendung auf die Modellbeispiele	41
5	Einsatz von Speichern und Wärmepumpen	45
5.1	Speicher	45
5.2	Wärmepumpen	53
6	Wärmeintegration eines milchwirtschaftlichen Prozesses	57
6.1	Beschreibung des Prozesses	57
6.2	Anwendung des Verfahrens	61
7	Zusammenfassung und Ausblick	70

Abbildungsverzeichnis

2.1	Vier Phasen eines Stoffumwandlungsprozesses	5
2.2	T, \dot{H} -Diagramm eines Gegenstrom- und eines Gleichstromwärmeübertragers	7
2.3	Typisierung der Stoffströme	8
2.4	Idealer Aufheiz- und Abkühlvorgang	11
3.1	Heiße und kalte Stoffströme und deren Summenkurven im T, \dot{H} -Diagramm	17
3.2	Die Wärmekaskade und das Wärmestromprofil	18
3.3	Wärmekaskade des <i>Batch</i> -Prozesses A	21
3.4	MHX-Netzwerk nach <i>Pinch</i> für Modellprozeß A	22
3.5	Netzwerk nach Relaxation von Modellprozeß A	22
3.6	OMNIUM-Netzwerk für Modellprozeß A	24
4.1	Netzwerke für Modellprozeß B	26
4.2	Verschaltungsmöglichkeiten mit maximaler Wärme	31
4.3	Parallelisierter Wärmeübertrager	33
4.4	Summenkurven nach <i>Parallelisierung</i>	34
4.5	Aufteilung der Restwärme	36
4.6	Prozeß A: OMNIUM-Netzwerke mit Restwärme nach Typ 1 und Typ 3	42
4.7	Prozeß B: MHX-Netzwerk nach <i>Parallelisierung</i>	44
5.1	Auf- und Entladevorgang eines ideal geschichteten Verdrängungsspeichers	46

5.2	<i>Pinch</i> -Problematik bei Speichern	47
5.3	Realisierung von Speichern im T, H -Diagramm	48
5.4	Prozeß A: MER-Netzwerk nach Typ 3	52
5.5	Prozeß B: MER-Netzwerk	53
5.6	Arbeitsweise des Kaltdampf-Kompressionsprozesses	54
6.1	Milchwirtschaftlicher Prozeß (nicht integriert)	58
6.2	Transformation der Wärmematrix	62
6.3	Reststromaufteilung der feuchten Luft nach Verschaltung	63
6.4	Verschaltungen des milchwirtschaftlichen Prozesses	66
6.5	Fließbild des integrierten Prozesses	69

Tabellenverzeichnis

2.1	Modellprozesse A, B und C	13
4.1	Zusammenstellung der Ergebnisse von Modellprozeß A und B	25
4.2	Ergebnisprotokoll: 1000 Prozesse mit je 5 heißen und 5 kalten Strömen	39
4.3	Optimale Verschaltungsfolgen	40
4.4	Prozeß B: Kenndaten der Wärmeübertrager	43
5.1	Prozeß A: Kenndaten der Speicher	51
6.1	Zusammenstellung der Stoffdaten des milchwirtschaftlichen Prozesses	60
6.2	Wärmebilanz	64

Kapitel 1

Einleitung

Industrielle Stoffumwandlungsprozesse werden im wesentlichen durch Prozeßwärme angetrieben. Diese Prozeßwärme wird unter Aufwand von Primärenergie in geeigneten Anlagen erzeugt und z.B. als Prozeßdampf bei unterschiedlichen Druckstufen bereitgestellt. Dieser Prozeßdampf liefert Wärme an die Apparate, in denen die Stoffumwandlungsprozesse ablaufen, z.B. an Reaktoren und Trennkolonnen in der chemischen Technik, an Bäder in der Textiltechnik oder auch an Kocher und Trockner in der Lebensmitteltechnik. Nach dem Energieerhaltungssatz ist nach Ablauf der Prozesse die Energiemenge im Kondensat des Prozeßdampfes, in den Produkten und in den Abwärmeströmen genau so groß wie der Energieinhalt der Edukte und des Prozeßdampfes vor Ablauf der Prozesse. Wenn das Kondensat in den Kessel zurückgeführt wird und der Energieinhalt der Produkte vernachlässigbar ist, findet sich die eingesetzte Primärenergie quantitativ in den Abwärmeströmen eines Prozesses wieder. Diese sind teilweise diffus, z.B. als Wärmeabgabe heißer Oberflächen oder Wärmeverluste bei Be- und Entladen von Öfen, teilweise auch gefaßt, d.h. treten als Enthalpieströme in Erscheinung. Die entsprechenden Stoffströme haben in der Regel eine niedrige Temperatur, z.B. ca. 50 °C, und sind daher ihrer weiteren direkten Nutzbarkeit weitgehend beraubt. Im thermodynamischen Sprachgebrauch spricht man davon, daß ihr spezifischer Exergiegehalt sehr klein ist. Da die Primärenergie, aus der sie letztlich entstanden sind, praktisch reine Exergie ist, hat bei der Wärmebereitstellung und Wärmenutzung im Prozeß eine erhebliche Exergievernichtung stattgefunden.

An der grundsätzlichen Unvermeidbarkeit von Exergievernichtung beim Ablauf realer technischer Prozesse führt kein Weg vorbei. Ein Produktionsprozeß ohne Abwärme ist nicht möglich. Die Quantität und Qualität der Abwärme für ein vorgegebenes Produktionsziel ist allerdings nicht naturgesetzlich festgelegt, sondern durch technische Maßnahmen in weiten Grenzen zu beeinflussen.

Die prinzipielle Ursache der Exergievernichtung bei der Verwandlung von Prozeßwärme in Abwärme ist wissenschaftlich seit langer Zeit verstanden. Sie läßt sich durch die einfache Formel

$$\dot{E}_V = \dot{Q} \cdot T_U \cdot \frac{\Delta T}{T_1 \cdot T_2} \quad (1.1)$$

beschreiben, in der \dot{E}_V der Exergieverlust, \dot{Q} der Wärmestrom, T_U die Umgebungstemperatur, $\Delta T = T_1 - T_2$ die Temperaturdifferenz bei der Wärmeübertragung und T_1, T_2 die Temperatur des wärmeabgebenden bzw. wärmeaufnehmenden Systems ist. Will man also Abwärmeströme klein halten, und damit entsprechend den Primärenergieeinsatz für einen Prozeß, dann muß man auf möglichst kleine Temperaturdifferenzen beim Transport der Wärme durch den Prozeß achten. Die Wärme muß kaskadenartig durch den Prozeß geführt werden, immer darauf bedacht, einen abzukühlenden Stoffstrom zur Aufwärmung eines aufzuheizenden Stoffstroms zu nutzen. Dieses Prinzip wird als Wärmeintegration bezeichnet und stellt einen Sonderfall der exergetischen Prozeßoptimierung dar.

Die Entwicklung eines Wärmeschaltplans mit optimaler Wärmeintegration ist eine Aufgabe von erheblicher wissenschaftlicher und praktischer Relevanz. Die wissenschaftliche Problemstellung ist die Erarbeitung einer Optimierungsstrategie, die z.B. auf ein Wärmeübertragernetzwerk mit minimalem Exergieverlust führt. Für stationäre Prozesse liegen solche Methoden heute vor. Sie lassen sich im wesentlichen gliedern in thermodynamische Methoden und algorithmische Methoden, wobei praktische Bedeutung bisher nur die thermodynamische *Pinch*-Technik erlangt hat. Für *Batch*-Prozesse, also solche, bei denen potentielle Wärmequellen und Wärmesenken nur zeitlich befristet und in der Regel versetzt zur Verfügung stehen, hat die Entwicklung der wissenschaftlichen Methoden noch keinen befriedigenden Stand erreicht. Die Übertragung der *Pinch*-Technik auf *Batch*-Prozesse führt zwar zu Wärmeschaltplänen für eine optimale Wärmerückgewinnung, dies aber mit großem Aufwand und mit einem in der Regel unwirtschaftlichen Ergebnis. Durch interaktive Relaxationsschritte muß aus dem Netzwerk mit minimalem Exergieverlust ein anderes, wirtschaftlich vernünftiges entwickelt werden. Die eingeführten rein algorithmischen Verfahren für *Batch*-Prozesse liefern zwar ein einfaches Netzwerk, erreichen aber exergetisch bei weitem nicht das Optimum. Entsprechend dem unbefriedigenden wissenschaftlichen Entwicklungsstand bleibt auch die technische Realisierung der Wärmeintegration bei *Batch*-Prozessen weit hinter dem technisch möglichen und wirtschaftlich attraktiven zurück. Dies ist insofern bedauerlich, als viele Prozesse insbesondere in kleinen und mittelständischen Unternehmen im *Batch*-Betrieb gefahren werden.

Angesichts dieser Ausgangssituation bestand die wissenschaftliche Problemstellung des beantragten Forschungsvorhabens in der Entwicklung eines Verfahrens zur Wärmeintegration

bei *Batch*-Prozessen, das im 1. Schritt ein einfaches Schaltbild hervorbringt und anschließend im Zuge systematischer Verbesserungen zu exergetisch immer günstigeren, damit aber auch aufwendigen Schaltungen führt. Insbesondere wurde der optimale Einsatz von Wärmespeichern und Wärmepumpen untersucht. Dabei heben Speicher die zeitliche Befristung der Wärmequellen und -senken teilweise auf, während Wärmepumpen das Abwärmepotential von z.B. exothermen Reaktionen auf ein günstigeres Temperaturniveau anheben können. Das aus dem entwickelten Verfahren erarbeitete Berechnungsprogramm dokumentiert die grundsätzliche computergestützte Machbarkeit einer wirtschaftlichen Wärmeintegration bei *Batch*-Prozessen.

Im Anschluß an diese Einleitung wird die prinzipielle Vorgehensweise bei der Anwendung thermodynamischer Methoden zur Wärmeintegration bei *Batch*-Prozessen erläutert. Sie besteht aus einer Überführung des realen Prozesses in ein mathematisches Modell, auf das eine Optimierungsmethode angewandt werden kann, deren Lösung dann wieder auf den realen Prozeß übertragen wird. Bei dieser Transformation des realen Problems auf die thermodynamische Ebene werden auf der einen Seite Hemmnisse bei der Einführung energetisch optimierter Lösungen ersichtlich. Auf der anderen Seite läßt sich das Problem der Wärmeintegration aber auf dieser Ebene präzise definieren und lösen. Typische Modellbeispiele werden an dieser Stelle abgeleitet, mit denen zum einen eine Überprüfung der Richtigkeit und zum anderen eine Bewertung des entwickelten Verfahrens möglich ist.

Der Stand der Forschung bzw. Technik wird im wesentlichen durch die *Pinch*-Methode und das OMNIUM-Verfahren repräsentiert. Sie sind Ausgangspunkt der Untersuchungen und werden in Kapitel 3 näher beschrieben. Die Vorteile des einfachen OMNIUM-Netzwerkes und die Energieziele der *Pinch*-Methode waren die Leitgrößen für das entwickelte Verfahren. Den evolutionären Vorgang der Methodenentwicklung gibt Kapitel 4 wieder. Im anschließenden Kapitel wird die Implementierung von Speichern und Wärmepumpen dargestellt. Das mögliche Potential des neuen Verfahrens wird in Kapitel 6 anhand von Beispielprozessen aufgezeigt und abschließend in Kapitel 7 diskutiert.

Kapitel 2

Modellierung von *Batch*-Prozessen

In diesem Kapitel soll erörtert werden, welche Merkmale charakteristisch für *Batch*-Prozesse sind, inwieweit sich diese Prozesse zur Wärmeintegration eignen und auf welche Art die Merkmale in der Modellierung berücksichtigt werden können. Anschließend soll dargestellt werden, wie man mit Hilfe der analytischen Lösung des Problems zu einem energetisch verbesserten Prozeß gelangt. Aus der Literatur bekannte Modellprozesse, die der Problemstellung entsprechen, werden daraufhin beispielhaft eingeführt.

2.1 Reale *Batch*-Prozesse

In klein- bis mittelständischen Unternehmen mit geringem Durchsatz bietet die absatzweise Produktion einige Vorteile gegenüber einer kontinuierlich betriebenen Anlage. Sie erlaubt vor allem eine hohe Flexibilität bei der Anpassung an zeitlich veränderliche Marktanforderungen. Aufgrund der teilweise recht hohen Qualitätsanforderungen an die Produkte ist die Prozeßtechnik auf die Sicherstellung der Qualität ausgerichtet und schenkt dem wirtschaftlichen Umgang mit Primärenergie nur geringe Beachtung. Der zur Einsparung von Primärenergie notwendige apparative Aufwand schränkt die Flexibilität der Produktion meist ein und kann sich auch auf sicherheitstechnische Aspekte nachteilig auswirken. Diese Randbedingungen stellen Hemmnisse dar, die der Realisierung des Einsparpotentials durch Wärmeintegration entgegenstehen. Um die Vorteile der *Batch*-Anlage nicht einzuschränken, müssen die Maßnahmen zur Energieeinsparung prinzipiell additiv gestaltet, d.h. zusätzlich zu den bestehenden Systemen hinzugefügt werden. Der wirtschaftliche Vorteil einer Wärmeintegration liegt somit in der Ersparnis der Betriebsmittel und muß gegen den Kostenaufwand der additiven Maßnahmen abgewogen werden. Nur in seltenen Fällen

kann eine Heiz- bzw. Kühleinrichtung vollständig durch prozeßinterne Wärmeübertragung substituiert werden.

2.1.1 Betrieblicher Ablauf

Typische *Batch*-Prozesse lassen sich durch vier Phasen kennzeichnen. Zunächst wird der Reaktor mit den Edukten gefüllt und auf Betriebstemperatur gebracht. In der zweiten Phase findet die eigentliche Reaktion statt, an die sich eine Abkühlphase anschließt. Nach der Entleerung wird der Reaktor während der Stillstandszeit, der vierten Phase, gegebenenfalls gereinigt. Diese vier Phasen werden in Abbildung 2.1 über die Zeit mit den entsprechenden Wärmeströmen dargestellt.

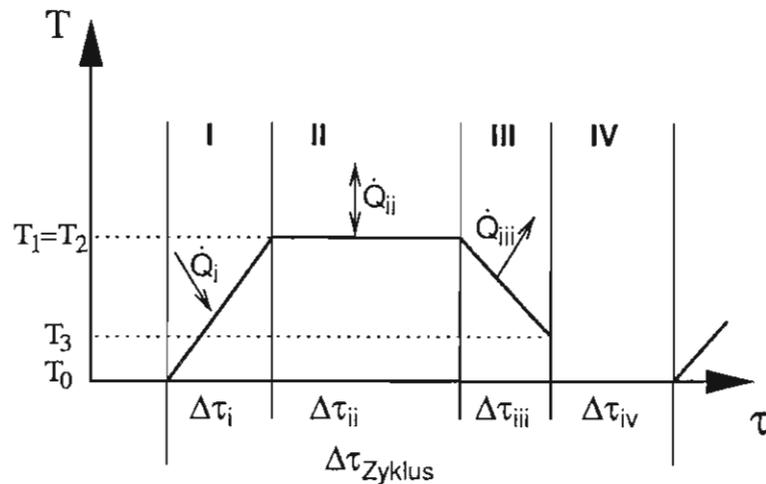


Abbildung 2.1: Vier Phasen eines Stoffumwandlungsprozesses

In Phase I wird der Eduktstrom von Temperatur T_0 auf T_1 gebracht. Dazu muß der Wärmestrom \dot{Q}_I zugeführt werden. In Phase II läuft eine exotherme oder endotherme Reaktion mit definierten Temperaturanforderungen ab, die ebenfalls eine Wärmeabfuhr bzw. -zufuhr von \dot{Q}_{II} erfordert. Nach Beendigung der Reaktion muß Wärme abgeführt werden, um das Produkt auf die geforderte Temperatur T_3 zu bringen. Während der Stillstandszeit findet keine Wärmeübertragung statt. Die Zykluszeit setzt sich aus der Summe der einzelnen Zeiten zusammen. Die Wärmezufuhr bzw. -abfuhr findet in der Regel durch Medien wie Dampf, Wasser oder Wärmeträgeröl statt, welche durch innen- oder außenverlegte Heiz- bzw. Kühlschlangen geleitet werden. Durch die Temperatur und den Massenstrom der Heiz- bzw. Kühlmedien kann der übertragene Wärmestrom gesteuert werden.

2.1.2 Möglichkeiten der Wärmeintegration

Bei einer Wärmeintegration wird versucht, den Heiz- und Kühlbedarf durch Nutzung der prozeßinternen Wärme zu minimieren. Da die vier Phasen eines einzelnen Reaktors nicht gleichzeitig auftreten, wird es im allgemeinen nur durch die Verwendung von Speichern möglich sein, die abzugebende Wärme beim Abkühlvorgang (Phase III) oder die freiwerdende Wärme aus einer exothermen Reaktion (Phase II) zum Vorheizen des Reaktors (Phase I) zu verwenden.

Ein interessanteres Problem mit größerem Einsparpotential ergibt sich bei Ausweitung der Systemgrenzen auf eine Vielzahl von Reaktoren, Trennkolonnen, Trocknungsanlagen und weiteren Prozessen, bei denen ein nutzbares Abwärmepotential und ein Wärmebedarf bestehen. Wärmebedarf besteht grundsätzlich bei der Raumheizung und der Warmwasserbereitstellung. Typische Abwärmequellen sind exotherme Reaktionen in der chemischen Industrie sowie der Brügendampf bei Trocknungsanlagen. Destillationen haben sowohl einen Heiz- als auch einen Kühlbedarf. Dieses erweiterte System von Wärmequellen und Wärmesenken kann mit einem geeigneten Netzwerk von Wärmeübertragern, Speichern und gegebenenfalls Wärmepumpen versehen werden, welches den Einsatz von Primärenergie minimiert. Die energetischen Einsparpotentiale sind durch systemanalytische Methoden zu analysieren. Dazu bietet sich zunächst die Transformation auf eine abstrakte thermodynamische Ebene, die T, \dot{H} -Ebene, an.

2.2 Transformation auf die T, \dot{H} -Ebene

Die Wärmeübertragung von einem kalten und einem heißen Strom findet, sofern eine stoffliche Trennung zwischen den beiden Stoffen gefordert wird, in Wärmeübertragern statt. Für einen adiabaten Wärmeübertrager gilt nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik, daß der heiße Strom genau den Wärmestrom abgibt, den der kalte Strom aufnimmt. Der zweite Hauptsatz schränkt den Vorgang weiter dahingehend ein, daß die Temperatur des heißen Stroms an keiner Stelle des Wärmeübertragers niedriger sein darf als die entsprechende Temperatur des kalten Stroms. Die charakteristischen Größen des Prozesses sind also Temperatur T und Wärmestrom \dot{Q} bzw. allgemein Enthalpiestrom \dot{H} , was die Behandlung von Reaktions-, Kondensations- und Verdampfungsenthalpien mit einschließt. Damit ist das T, \dot{H} -Diagramm die geeignete thermodynamische Darstellungsebene. Bei bekannten Anfangs- und Endtemperaturen sowie Wärmekapazitätsströmen eines heißen Stromes und eines kalten Stromes läßt sich je nach Führung der Ströme durch einen Wärmeübertrager (Gegenstrom, Gleichstrom oder Kreuzstrom) der übertragbare Wärmestrom leicht in

einem T, \dot{H} -Diagramm ablesen, wie es in Abbildung 2.2 zu sehen ist.

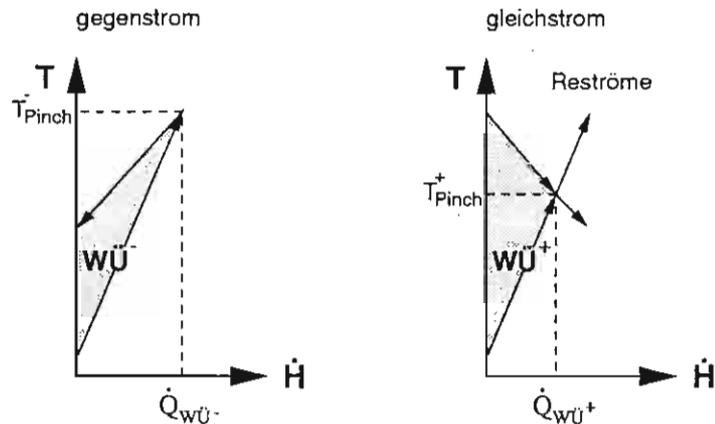


Abbildung 2.2: T, \dot{H} -Diagramm eines Gegenstrom- und eines Gleichstromwärmeübertragers

In der Abbildung ist auf der linken Seite ein Wärmeübertrager mit Gegenstromführung dargestellt, bei dem der kalte Strom von dem heißen Strom vollständig aufgeheizt wird. Dabei verläuft der heiße Strom von rechts nach links und der kalte Strom von links nach rechts. Die Steigung der Geraden ergibt sich aus dem Kehrwert der Wärmekapazitätsströme zu $1/(\dot{m}c_p)_i$. An keiner Stelle der Wärmeübertragung liegt die Temperatur des heißen Stromes unter der des kalten Stromes. Am heißen Ende des Wärmeübertragers sind die Temperaturen von heißem und kaltem Strom identisch. Um in diesem theoretischen Grenzfall noch eine Wärmeübertragung zu gewährleisten, müssten die Übertragerflächen unendlich groß werden. Diese Stelle, an dem die Temperaturdifferenz am geringsten ist, wird mit *Pinch* bzw. *Pinch-Point* bezeichnet. Die zugehörige *Pinch*-Temperatur T_{Pinch}^- entspricht der Zieltemperatur des kalten Stromes und schränkt die Wärmeübertragung somit nicht ein.

Bei Gleichstromführung sind beide Ströme von links nach rechts gerichtet. Die Geraden schneiden sich bei der *Pinch*-Temperatur T_{Pinch}^+ des Gleichstromsystems, die niedriger liegt als die des Gegenstromsystems. Folglich kann der kalte Strom nicht vollständig aufgeheizt werden und es verbleiben ein aufzuheizender und ein abzukühlender Strom, die mit anderen Mitteln auf ihre Zieltemperaturen gebracht werden müssen. Aufgrund des größeren übertragbaren Wärmestroms durch Gegenstromführung findet dieses Prinzip eine größere Anwendung. Bei der Wärmeintegration ist diese Stromführung eine wichtige Voraussetzung für effiziente Lösungen.

Mit Hilfe des T, \dot{H} -Diagramms läßt sich die Wärmeintegrationsanalyse von einer Schar von heißen und kalten Strömen durchführen, wie es in Kapitel 3 beschrieben wird. Dazu ist

es notwendig, für jede mögliche Abwärmequelle und jeden Wärmebedarf des bestehenden Systems die zur Erstellung des T, \dot{H} -Diagramms erforderlichen Daten zu ermitteln. Die Vielfalt der Wärmetransferprozesse läßt sich nach [1] wie folgt klassifizieren (s. Abbildung 2.3).

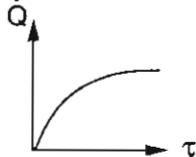
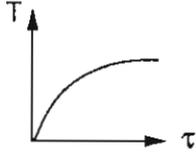
Typ	Kennzeichen	
A	$\dot{m}_i, \dot{Q}_i = \text{konst. für Intervall } [\tau_{\text{anf}}, \tau_{\text{ende}}]$ - Fließströme	
B	$T_i = \text{konst.}, \dot{Q}_i = f(\tau)$ - exo/endotherme Reaktionen - Austretende Gase bei Trocknern	
C	$T_i = f(\tau), \dot{Q}_i = f(\tau)$ - Aufheiz- und Abkühlvorgänge in Reaktoren	

Abbildung 2.3: Typisierung der Stoffströme

Bei Prozessen des Typs A werden Stoffströme aufgeheizt oder abgekühlt, wie es bei kontinuierlichen Prozessen aber auch beim Erwärmen von Edukten im Zulauf oder beim Abkühlen von Produkten außerhalb des Reaktors bei *Batch*-Prozessen auftritt. Für diesen Typ sind die Daten Ein- und Austrittstemperatur, T_{ein} und T_{aus} , sowie der Wärmekapazitätsstrom $\dot{m}c_p$ zu ermitteln. Im T, \dot{H} -Diagramm bilden sich diese Ströme durch eine Gerade ab. Bei kondensierendem Dampf bzw. verdampfendem Wasser entartet die Gerade zu einer Horizontalen. Um numerische Probleme bei der algorithmischen Umsetzung zu vermeiden, wird dazu zwischen Ein- und Austrittszustand der Ströme eine endliche Temperaturdifferenz von z.B. $1K$ definiert und gleichzeitig der Wärmekapazitätsstrom gleich dem Verdampfungsenthalpiestrom $d\dot{H}_V$ gesetzt.

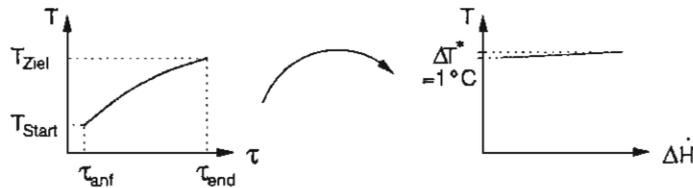
Zeitlich variierende Wärmeströme bei konstanter Temperatur, wie sie bei exothermen oder endothermen Reaktionen auftreten können, sind Ströme des Typs B. Der zeitliche Verlauf kann diskretisiert und innerhalb der einzelnen Zeitintervalle konstant behandelt werden. Dabei ist zu entscheiden, ob jeweils ein Mittelwert oder ein Minimalwert des Wärmestromes bei der Durchführung einer Wärmeintegrationsanalyse herangezogen werden soll. Die zu- bzw. abzuführende Reaktionsenthalpie ist analog zur Verdampfung/Kondensation auf

eine endliche Temperaturdifferenz zu verteilen. Für jedes Zeitintervall bildet sich dieser Wärmestrom als Horizontale im T, \dot{H} -Diagramm ab.

Bei den für *Batch*-Prozesse typischen Aufheiz- und Abkühlvorgängen in Reaktoren wird kein Stoffstrom, sondern eine bestimmte Stoffmenge über einen gewissen Zeitraum von einer Anfangstemperatur zum Zeitpunkt τ_{anf} bis zum Zeitpunkt τ_{end} auf die Zieltemperatur gebracht. Ein T, \dot{H} -Diagramm läßt sich für diesen Typ C also nicht unmittelbar zeichnen. Zur Einbindung solcher Wärmequellen und -senken in die Wärmeintegrationsanalyse, die letztlich Gegenstromprozesse betrachtet, muß ein äquivalenter Stoffstrom generiert werden, der über den gesamten Zeitraum dieselbe Wärmemenge aufnimmt/abgibt wie die im Behälter befindliche Stoffmenge. Zustandänderungen einer Stoffmenge innerhalb eines vorgegebenen Zeitintervalls lassen sich wie folgt in einen stationären Stoffstrom des Typs A transformieren:

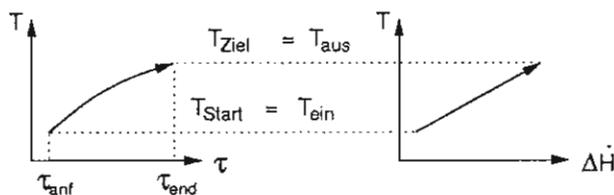
1. konservativ Abschätzung durch konstante Wärme bei T_{Ziel}

- (a) Durchschnittlicher Wärmestrom $\bar{Q} = \frac{T_{Ziel} - T_{Start}}{\tau_{anf} - \tau_{end}} \cdot mc_p$
- (b) Endliche Temperaturdifferenz $\Delta T^* = 1 \text{ K}$
- (c) Endlicher Wärmekapazitätsstrom $(\dot{m}c_p) = \bar{Q} / \Delta T^*$



2. Idealisierte Abschätzung bei externer Heizung bzw. Kühlung

- (a) Wärmekapazitätsstrom $\dot{m}c_p = \frac{mc_p}{\tau_{anf} - \tau_{end}}$
- (b) Eintrittstemperatur in das System $T_{ein} = T_{Start}$
- (c) Austrittstemperatur in das System $T_{aus} = T_{Ziel}$



Sowohl die konservative als auch die idealisierte Transformation ist für eine aufzuheizende Stoffmenge in einen Wärme aufnehmenden Stoffstrom in den entsprechenden Diagrammen dargestellt. Im Rahmen der Wärmeintegrationsanalyse garantiert die erste Transformation, daß ein heißer Strom, der diesen Aufheizvorgang leistet, die geforderte Wärmemenge bei einem Temperaturniveau liefert, welches während des gesamten Zeitraums oberhalb der Zieltemperatur liegt.

Bei Verwendung einer externen Umlaufheizung fließt ein Strom durch einen Wärmeübertrager. Findet im Idealfall keine thermische Durchmischung während des Aufheizvorganges im Kessel statt, sondern kommt es zu einer Temperaturschichtung, so läßt sich eine Transformation vom T, τ -Diagramm zum T, \dot{H} -Diagramm realisieren, wie es unter Punkt 2 gezeigt wird. Die Verwendung von ideal geschichteten Entleerungsspeichern ermöglicht sogar diese Transformation bei idealen Rührkesseln (vgl. Abschnitt 2.3).

Ist der technische Aufwand, der von dieser idealisierten Transformation gefordert wird, zu hoch und ist die konservative Abschätzung zu pessimistisch, dann kann der Aufheizvorgang in viele Teilvorgänge mit einer entsprechend zeitlichen Abfolge zerlegt werden. Diese Teilvorgänge werden wiederum nach Punkt 1 konservativ abgeschätzt. Dadurch erschließt sich für die Wärmeintegration ein größeres Potential als ohne zeitliche Zerlegung, das z.B. durch Vorheizen mittels prozeßeigenen Strom ausgeschöpft werden kann. Dabei führt diese Diskretisierung auch zu sehr komplexen und aufwendigen Netzwerken.

2.3 Rücktransformation auf reale Prozesse

Die analytische Lösung auf der thermodynamischen Ebene muß schließlich wieder in einen realen Prozeß umgesetzt werden. Sie besteht aus einem Netzwerk von Wärmeübertragern, Speichern und Wärmepumpen. Dabei ist es nicht die Aufgabe des Verfahrens, den Prozeß zeitlich neu zu strukturieren, obwohl dies häufig ein erhebliches Potential bietet, aber gerade die Flexibilität der einzelnen Prozesse einschränkt. Dem Ablaufplaner bleibt es vorbehalten, sinnvolle Zeitstrukturen zu ermitteln, für die das analytische Verfahren ein Optimum der Zielgrößen findet. Das Verfahren liefert Kenndaten von Wärmeübertragern, aus denen sich ein Schaltbild systematisch zusammenfügen läßt. Die Daten umfassen die Ein- und Austrittstemperaturen der heißen und kalten Stoffströme sowie die Massenströme, die durch den Wärmeübertrager fließen. Zusätzlich werden ihre Einsatzzeiten angegeben. Daraus lassen sich sowohl der momentane Wärmestrom und auch die Wärmemenge, die über den vom Anwender definierten Referenzzyklus übertragen wird, bestimmen. Die Aufgabe bei der Übertragung der analytischen Lösung auf den realen Prozeß besteht nun darin,

zu überprüfen, inwieweit sich diese Wärmeübertrager realisieren lassen. Speziell bei einem Aufheizvorgang ist die Möglichkeit einer Vorlauferhitzung oder einer externen Umlauferhitzung in Betracht zu ziehen. Vor allem limitieren räumliche Grenzen den Einsatz bestimmter Wärmeübertrager. Eine kleine durchschnittliche Temperaturdifferenz zwischen heißen und kaltem Medium erfordert eine große Übertragerfläche. Bei Heizschlangen in Reaktoren wird möglicherweise der zur Verfügung stehende Platz für kleine Temperaturdifferenzen bei großen Wärmeleistungen nicht ausreichen. Bei der Entwicklung der Wärmeintegration wird somit die Forderung nach interaktiven Eingriffsmöglichkeiten des Anwenders gestellt. Er muß z.B. bestimmte Stoffpaarungen ausschließen können, die nicht miteinander in Kontakt treten dürfen, um die Produktqualität durch die Wärmeintegration nicht zu gefährden.

Ein weiterer Aspekt bei der Anwendung wärmeintegrierender Maßnahmen ist die Regelbarkeit des Prozesses. Dies wird zu einem größerem Problem, wenn die Zykluszeiten der verschalteten heißen und kalten Ströme unterschiedlich sind und sich somit die Überlappungszeiten ändern. Eine Umschaltung von externer Heizung auf prozeßinterne Heizung muß während des Betriebs möglich sein. Auch muß eine durch die Analyse vorgeschlagene Stromaufspaltung während des Prozesses realisiert werden können. Ein wesentlicher zusätzlicher Freiheitsgrad entsteht bei der Einbindung von Speichern. Ein Beispiel, wie der Aufheiz- und Abkühlvorgang mit ideal geschichteten Entleerungsspeichern aussehen kann, zeigt Abbildung 2.4.

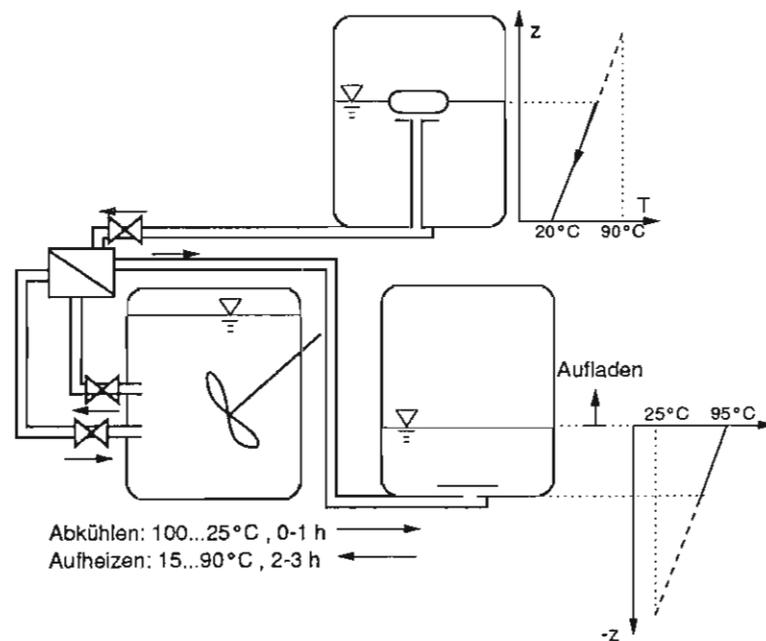


Abbildung 2.4: Idealer Aufheiz- und Abkühlvorgang

Durch die ideale Schichtung der beiden befindlichen Entleerungsspeicher kann der zeitli-

che Aufheiz-/Abkühlvorgang räumlich entlang der vertikalen z -Achse der Speicher verteilt werden. Die Temperaturverteilung des Speichermediums in den Speichern ist jeweils in den entsprechenden z, T -Diagrammen eingezeichnet. Während das Koordinatenkreuz im oberen Speicher am Boden verankert ist, wandert das Koordinatensystem des unteren Speichers mit der Oberfläche des Speichermediums, d.h. beim Aufladevorgang nach oben und beim Entladevorgang nach unten. Die Schichtung ergibt sich durch die Dichteabhängigkeit von der Temperatur. Der Schwimmer des oberen Tanks sorgt dafür, daß das wärmere Wasser nach oben über die kalten Schichten gelangt. Dieser Zulauf bei Aufheizvorgängen im Kessels und somit Entladevorgängen im Speicher ist gleichzeitig Entnahmestelle bei Abkühlvorgängen im Kessel und somit Aufladevorgängen im Speicher. Im dargestellten Beispiel wird das Speichermedium während des Übergangs vom Entladevorgang zum Aufladevorgang um $5\text{ }^\circ\text{C}$ erwärmt, während das heiße Produkt um $75\text{ }^\circ\text{C}$ abgekühlt wird. Aus der Energiebilanz folgt, daß das Speichermedium eine 15-fache Wärmekapazität als das Produkt besitzen muß. Das Verhältnis wird bei zunehmender Temperaturspreizung des Speichers geringer. Entsprechend sinkt aber die Nutzbarkeit der gespeicherten Wärme. Neben der Temperaturspreizung ist auch die minimale Temperaturdifferenz in den Wärmeübertragern eine aus wirtschaftlichen Gründen zu optimierende Größe, welche iterativ durch mehrmaliges Anwenden eines Wärmeintegrationsverfahrens ermittelt werden kann.

2.4 Modellbeispiele

Wie aus den vorherigen Abschnitten ersichtlich, sind folgende Größen der Stoffe bei der Wärmeintegration von Interesse:

- Eintrittstemperatur $T_{ein,i}$ des Stoffes i in das System,
- Austrittstemperatur $T_{aus,i}$ des Stoffes i aus dem System,
- Wärmekapazitätsstrom $(\dot{m}c_p)_i$ des Stoffes i in dem Temperaturbereich und das
- Zeitintervall $[\tau_{anf}, \tau_{end}]_i$ in dem der Stoff i abgekühlt bzw. aufgeheizt werden muß.

Im oben beschriebenen einfachen Reaktor mit exothermer oder endothermer Reaktion, sind die Wärmekapazitäten beim Aufheiz- und Abkühlvorgang identisch. In einem komplexen System mit einer Vielzahl von Abwärmequellen und Wärmeverbrauchern, die miteinander verschaltet werden können, sind alle Variationen der Größen denkbar. Modellbeispiele zur Überprüfung bzw. Bewertung verschiedener Wärmeintegrationsverfahren können aufgrund

der Unabhängigkeit der Größen in beliebiger Zahl und Art mittels Zufallgenerator erzeugt werden (s. Abschnitt 4.3).

Im Fortlauf der Untersuchungen sollen alle betrachteten Verfahren anhand der Modellprozesse A, B (s. Tabelle 2.1) bewertet werden. Auf eine Prozeßbeschreibung wird an dieser Stelle verzichtet und auf die Literatur verwiesen, der diese Prozesse entstammen. Die beiden instationären Modellprozesse A und B werden in [1, 2, 3] (Prozeß A) bzw. [4] (Prozeß B) beschrieben. Ihre charakteristischen Merkmale werden erst auf der abstrakten thermodynamischen Ebene erkennbar. Ein einfacher stationärer Prozeß C, der [5] entnommen ist, dient zur Erläuterung der *Pinch*-Methode.

Strom	T_{ein}	T_{aus}	τ_{anf}	τ_{end}	$\dot{m}c_p$	Q	Q
	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	h	h	$kW/^{\circ}C$	kW	kWh
Modellprozeß A							
H2	170	60	0,25	1,00	4,0	440	330
H4	150	30	0,30	0,80	3,0	360	180
C1	20	135	0,50	0,70	10,0	1150	230
C3	80	140	0,00	0,50	8,0	480	240
Modellprozeß B							
AQ1	500	300	3	15	1,0	200	2400
AQ2	550	300	3	21	2,0	400	7200
AQ3	500	300	9	21	1,5	300	3600
WV1	350	550	9	21	2,0	400	4800
WV2	300	500	3	21	1,0	200	3600
WV3	350	550	9	21	2,0	400	4800
WV4	300	500	6	18	2,0	400	4800
Modellprozeß C							
H1	400	310	0,00	1,00	2,0	180	180
H4	450	350	0,00	1,00	1,0	100	100
C2	300	390	0,00	1,00	1,8	162	162
C3	330	370	0,00	1,00	4,0	160	160

Tabelle 2.1: Modellprozesse A, B und C

Kapitel 3

Grundlegende Verfahren zur Wärmeintegration

Im Bereich der Forschung sind die Grundlagen der Wärmeintegrationsanalyse in den letzten 20 Jahren vornehmlich von Hochschulinstituten weltweit entwickelt worden. Der Stand der Technik wird durch die Verbreitung dieser Methoden in der industriellen Praxis repräsentiert. Er ist im wesentlichen an die Verfügbarkeit einer anwenderfreundlichen Software gebunden. Der folgende Abschnitt soll einen Überblick der existierenden Verfahren geben, bevor die weitverbreitete *Pinch*-Methode und das relativ junge OMNIUM-Verfahren genauer beschrieben werden.

3.1 Überblick

Für stationäre Prozesse ist die Wärmeintegrationsanalyse nach der *Pinch*-Methode ein etabliertes, weitgehend computergestützt handhabbares Instrument [6]. Zur Untersuchung eines Prozesses nach dieser Methode werden zunächst die abzukühlenden und aufzuheizenden Prozeßströme identifiziert und in Bezug auf ihre Ein- und Austrittstemperaturen sowie ihre Wärmekapazitätsströme analysiert. Mit Hilfe der Temperaturintervallanalyse lassen sich die sogenannten Energieziele ermitteln, d.h. der bei optimaler Wärmeintegration zuzuführende Heizwärmestrom und der korrespondierende Abwärmestrom. Beide Informationen stellen insofern thermodynamische Optimalwerte dar, als sie mengenmäßig minimal und von der Qualität optimal sind. Beim Heizwärmestrom heißt optimale Qualität die Forderung bei einer möglichst niedrigen Temperatur, d.h. bei einem möglichst niedrigen Exergiegehalt. Beim Abwärmestrom heißt optimale Qualität die Verfügbarkeit bei

möglichst hoher Temperatur. Die Realisierung der Energieziele erfolgt durch ein Wärmeübertragernetzwerk. Die Gestaltung dieses Netzwerkes erfolgt ebenfalls computergestützt auf der Basis teilweise strenger, teilweise heuristischer Regeln. Bei Prozessen mit vielen heißen und kalten Strömen kann die Generierung des Wärmeübertragernetzwerkes recht aufwendig werden. Das exergetisch optimale Netzwerk ist in der Regel nicht wirtschaftlich optimal. Es wird vielmehr in nachfolgenden sogenannten Relaxationsschritten wirtschaftlich optimiert. Insgesamt ist die Entwicklung der Wärmeintegrationsanalyse für stationäre Prozesse nach der *Pinch*-Methode heute ein wissenschaftlich weitgehend abgeschlossenes Gebiet. Die Kenntnis des *Pinch*, d.h. einer Temperatur, die den Prozeß in eine Wärmesenke und eine Wärmequelle aufteilt, ist von großem Nutzen für die Analyse seiner Wärmewirtschaft. Die Umsetzung der *Pinch*-Methode in kommerziell verfügbare Software ist weit vorangeschritten, und die Anwendung zumindest in der chemischen Großindustrie ist Stand der Technik. Als Beispiele für verfügbare Software sind hier zu nennen:

- SUPERTARGET (Linnhoff March Ltd., Tabley Court, Moss Lane, Over Tabley, Knutsford, WA 160PL, UK)
- ADVENT (Aspen Technology Inc., Ten Canal Park, Cambridge, Massachusetts 02141, USA)
- HEXTRAN (Simulation Sciences, Brea Ca, USA)
- SYNEP (Belsim s.a., Centre Socran, Parc Industriel du Sart-Tilman, Allée des Noisetiers 1, 4031 Angleur-Liège, Belgique)

Demgegenüber konnten sich andere Methoden, z.B. die rein algorithmische MINLP-Methode [7, 8] und die Methode der Evolutionsstrategie [9, 10], zwar in der Wissenschaft entwickeln, aber noch nicht in der Praxis durchsetzen.

Für instationäre Prozesse, also *Batch*-Prozesse, ist die Wärmeintegrationsanalyse noch in einem unbefriedigenden wissenschaftlichen Entwicklungszustand. Es existieren verschiedene Ansätze, die *Pinch*-Methode auf *Batch*-Prozesse zu übertragen [11]. Bei dem *time average model* wird der Zeitfaktor durch Mittelung der Wärmeströme über die Prozeßzeit eliminiert und mit diesen gemittelten Wärmeströmen die *Pinch*-Analyse durchgeführt. Somit ist das berechnete Ergebnis für die übertragbare Wärme zu optimistisch. Bei der Wärmeintegration nach dem *time slice model* wird eine Temperaturintervallanalyse für unterschiedliche Zeitscheiben durchgeführt, die durch die Anfangs- und Endzeiten der Wärmequellen und Wärmesenken eines *Batch*-Prozesses definiert sind [3]. Die Energieziele des Prozesses ergeben sich aus der Summe der Energieziele aller Zeitintervalle. Sie repräsentieren wieder

das thermodynamische Optimum. Dabei können für die einzelnen Zeitscheiben Wärmekaskaden (Methode der *cascade analysis*) ermittelt werden. Zur Realisierung dieser Energieziele wird ein Wärmeübertragernetzwerk konstruiert, indem zunächst für jede Zeitscheibe ein eigenes Netzwerk entworfen und das gesamte Netzwerk schließlich durch Superposition der Netzwerke für die einzelnen Zeitscheiben entwickelt wird. In diesem Netzwerk werden die einzelnen Wärmeübertrager zu unterschiedlichen Zeiten mit unterschiedlichen Wärmelasten beaufschlagt. Es ist in der Regel nur mit hohem Aufwand zu entwerfen, unwirtschaftlich kompliziert und muß daher in detaillierten Relaxationsschritten einer wirtschaftlichen Gestaltung zugeführt werden. Bei der Methode der *time event charts* wird die Zykluszeit des gesamten Prozesses durch Darstellung der einzelnen Apparate über der Zeitachse ermittelt. Dadurch kann der Apparat identifiziert werden, der die Zykluszeit des gesamten Prozesses nach unten begrenzt. Die Wärmeintegration wird durchgeführt, wobei die notwendigen Zeiten der einzelnen Apparate zur Erfüllung ihrer Aufgabe verringert werden. Die nun erreichbare, verkürzte Zykluszeit wird innerhalb eines neuen *time event charts* bestimmt. Aus dem Verhältnis der Zykluszeiten kann eine mögliche Kapazitätssteigerung berechnet werden.

Ein anderes, speziell für die Wärmeintegration von *Batch*-Prozessen entwickeltes Verfahren ist unter dem Namen OMNIUM bekannt geworden [4]. Es geht nicht vom thermodynamischen Ziel der Exergieverlustminimierung aus, sondern sucht das Maximum der intern übertragbaren Wärme. Die Formulierung des Optimierungsproblems in einer Matrix zur Zuordnung der Abwärmequellen zu den Wärmeverbrauchern führt dabei zu der Einschränkung, daß jeder Strom nur einmal verschaltet werden darf. Algorithmisch läßt sich das Zuordnungsproblem mit der sogenannten *ungarischen* Methode [12] problemlos lösen. Man gelangt somit nach dem OMNIUM-Verfahren auf einfache Weise zu einem relativ überschaubaren Wärmeschaltplan, der eine unter den genannten Randbedingungen optimale Wärmeintegration herbeiführt, allerdings insgesamt suboptimal in Bezug auf Exergieverlust und damit einhergehende Abwärme ist. Insbesondere bietet OMNIUM keinen Hinweis auf das thermodynamisch erreichbare Optimum.

3.2 Pinch-Methode

Bei der *Pinch*-Methode werden verschiedene Annahmen getroffen, die in Abschnitt 2.2 bereits impliziert wurden. Es sind

- die Vernachlässigung der Temperaturabhängigkeit für die Wärmekapazitäten der Stoffströme,

- die Vernachlässigung von Wärmeverlusten,
- die Vernachlässigung von Änderungen der potentiellen und kinetischen Energie der Stoffströme,
- die Druckunabhängigkeit der Enthalpie der Stoffströme und
- die Behandlung von Wärmeübertragern als reine Gegenströmer.

Der Wärmeverlust eines realen Wärmeübertragers kann zumindest näherungsweise berücksichtigt werden, indem Wärmebedarf und -angebot der Stoffströme geeignet korrigiert werden.

Nachdem die Stoffstromdaten in der Form der Modellbeispiele vorliegen (vgl. Abschnitt 2.4), lassen sich alle Ströme im T, \dot{H} -Diagramm darstellen. Zur Ermittlung des maximal übertragbaren Wärmestroms $\dot{Q}_{W\ddot{U},max}$ bei stationären Prozessen werden jeweils eine heiße und eine kalte Summenkurve gebildet. Sie lassen sich im T, \dot{H} -Diagramm eingezeichnet derart parallel zur Abszisse verschieben, daß Temperaturdifferenz zwischen heißer und kalter Summenkurve an keiner Stelle eine geforderte minimale Temperaturdifferenz unterschreitet. Der Grenzfall ist für den stationären Modellprozeß C mit einer minimalen Temperaturdifferenz von $\Delta T_{min} = 10\text{ K}$ in Abbildung 3.1 zu sehen.

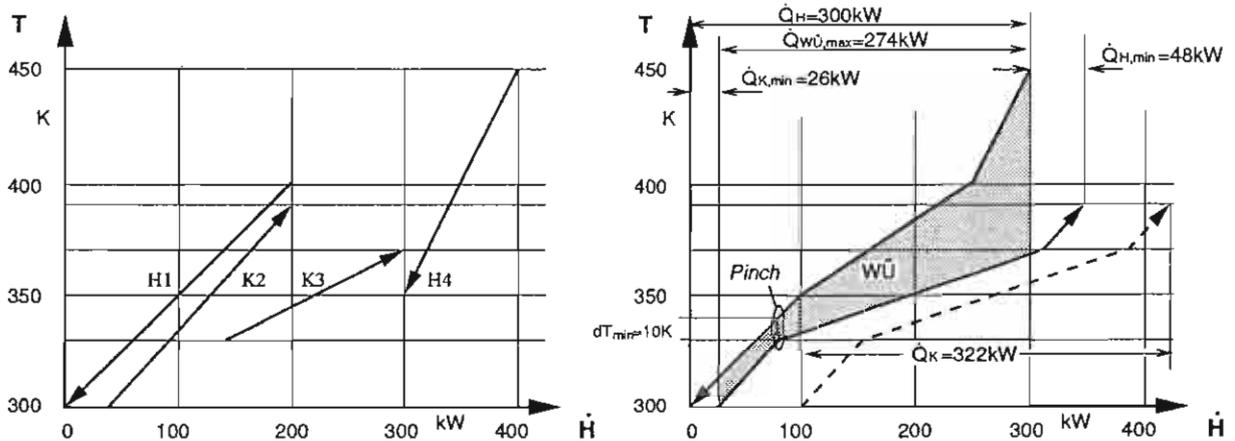


Abbildung 3.1: Heiße und kalte Stoffströme und deren Summenkurven im T, \dot{H} -Diagramm

Im linken Diagramm sind die einzelnen Ströme aus dem Beispielprozeß dargestellt, die im rechten Diagramm zu Summenkurven zusammengefaßt werden. Genau wie bei der Wärmeübertragung zwischen je einem heißen und einem kalten Strom, wird auch bei Summenkurven die Stelle des kleinsten vertikalen Abstands (= minimale Temperaturdifferenz)

als *Pinch* bezeichnet. Mit Hilfe dieser Summenkurven lassen sich Werte, wie minimaler Kühl- bzw. Heizbedarf, $\dot{Q}_{K,min}$ und $\dot{Q}_{H,min}$, sowie maximal übertragbarer Wärmestrom, $\dot{Q}_{WÜ,max}$ leicht ablesen. Übersichtlicher ist die Darstellung des Wärmestromprofils als Differenz der beiden Summenkurven im T, \dot{H} -Diagramm (vgl. Abbildung 3.2 rechts). Das Wärmestromprofil gibt zusätzlich Auskunft über die Qualität der zu- bzw. abzuführenden Wärme. Die Transformation dieser grafischen Methoden zur Ermittlung der Energieziele in ein analytisches Verfahren ist bekannt. Dazu wird eine vom Heißen zum Kalten verlaufende Wärmekaskade aufgestellt, wie sie im linken Teil von Abbildung 3.2 zu sehen ist.

Intv.	T. /K	\dot{Q}_i/kW	$\Delta\dot{Q}_i/kW$	$\Delta\dot{Q}_i^*/kW$
	450		0	-48
1	400	-50	-50	-98
2	380	-24	-74	-122
3	350	+84	+10	-38
4	340	+38	+48	0
5	310	-6	+42	-6
6	300	-20	+22	-26

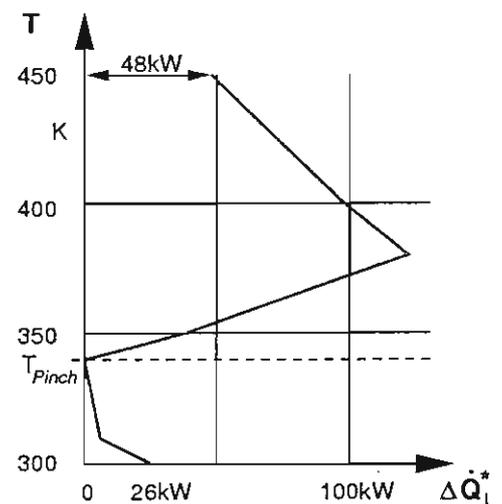


Abbildung 3.2: Die Wärmekaskade und das Wärmestromprofil

Um diese Wärmekaskade aufzustellen, wird z.B. zu den kalten Strömen jeweils die minimal zulässige Temperaturdifferenz $\Delta T_{min} = 10 \text{ K}$ hinzu addiert. Es lassen sich nun Temperaturintervalle aufstellen, die durch die Ein- und Austrittstemperaturen aller heißen und transformierten kalten Ströme definiert sind. Für den Modellprozeß C ergeben sich 6 Temperaturintervalle. Für jedes dieser Temperaturintervalle, ausgehend von der höchsten Prozeßtemperatur, wird die Energiebilanz aufgestellt. Als Ergebnis erhält man für jedes Temperaturintervall i den Wärmestrom

$$\dot{Q}_i = \left[\sum_k (\dot{m}c_p)_k - \sum_h (\dot{m}c_p)_h \right]_i \cdot \Delta T_i, \quad (3.1)$$

als Differenz des von den kalten Stoffströmen summarisch aufzunehmenden und des von den heißen Strömen summarisch abzugebenden Wärmestroms. Ergibt sich ein negativer Wert, $\dot{Q}_i < 0$, so entsteht in dem Temperaturintervall ein Wärmeüberschuß, d.h. die heißen Ströme geben in diesem Temperaturintervall mehr Wärme ab als die kalten benötigen.

Ergibt sich hingegen aus 3.1 ein positiver Wert, $\dot{Q}_i > 0$, so entsteht in dem Temperaturintervall ein Wärmedefizit, d.h. die kalten Ströme dieses Temperaturintervalls benötigen mehr Wärme als die heißen abgeben können. Aus den Wärmeüberschüssen bzw. Wärmedefiziten der einzelnen Temperaturintervalle werden für jedes Temperaturintervall i durch Addition kumulierte Überschüsse bzw. Defizite berechnet, nach

$$\Delta\dot{Q}_i = \sum_i \dot{Q}_i, \quad (3.2)$$

wobei der Index i von den hohen zu den niedrigen Temperaturen läuft. Ein Wärmeüberschuß kann von einem höheren Temperaturintervall auf das nächst niedrigere abgegeben werden und dazu dienen, dessen eventuelles Wärmedefizit abzudecken. Die aufeinanderfolgende Anordnung der Temperaturintervalle sichert die Minimierung der Temperaturdifferenzen und damit des Exergieverlustes bei der internen Wärmeübertragung. Die Wärme wird stets auf die nächst tiefer liegende Temperatur übertragen, im Sinne einer Kaskade. Das größte kumulierte Wärmedefizit der Kaskade $\Delta\dot{Q}_{max}$ muß durch Heizung von außen aufgebracht werden und entspricht deshalb dem mindestens zuzuführenden Wärmestrom. Unter Berücksichtigung dieses von außen zuzuführenden Wärmestroms ergeben sich die Netto-Wärmedefizite bzw. Netto-Wärmeüberschüsse zu

$$\Delta\dot{Q}_i^* = -\Delta\dot{Q}_{max} + \Delta\dot{Q}_i, \quad (3.3)$$

und es gilt

$$\Delta\dot{Q}_{H,min} = -\Delta\dot{Q}_0^* = \Delta\dot{Q}_{max} = 48 \text{ kW}, \quad (3.4)$$

sowie

$$\Delta\dot{Q}_{K,min} = -\Delta\dot{Q}_6^* = 26 \text{ kW}. \quad (3.5)$$

An der *Pinch*-Temperatur ist $\Delta\dot{Q}_i^* = 0$. Aus dieser Erkenntnis lassen sich die folgenden drei sog. *Pinch*-Regeln eruieren:

- Keine Wärmeabfuhr oberhalb des *Pinch*,
- keine Wärmezufuhr unterhalb des *Pinch* und
- keine Wärmeübertragung über den *Pinch*.

Eine Verletzung dieser Regeln führt zwangsläufig zu einer Erhöhung des Betriebsmitteleinsatzes. Um bei der Entwicklung eines Wärmeübertragernetzwerkes die ermittelten Energieziele zu erfüllen, wird von *Linnhoff et al.* [6] vorgeschlagen, die Verschaltung der Stoffströme für das System ober- und unterhalb des *Pinch* getrennt vorzunehmen. Dadurch wird vermieden, Wärme über den *Pinch* zu übertragen. Die beiden Teilsysteme sind dann energetisch unabhängig voneinander. Vom *Pinch* ausgehend werden die Stoffströme, getrennt für jedes Subsystem, miteinander verschaltet. Dabei gelten für die Platzierung der Wärmeübertrager, in denen Stoffströme auf die *Pinch*-Temperatur abgekühlt bzw. aufgeheizt werden, strenge Regeln, die für die Auslegung der Wärmeübertrager, die weiter von der *Pinch*-Temperatur entfernt arbeiten, nicht mehr gelten.

Für das Teilsystem oberhalb des *Pinch* muß die Anzahl der heißen Stoffströme direkt am *Pinch* kleiner oder gleich der Anzahl der kalten Stoffströme sein. Ist dies nicht der Fall, so muß mindestens ein kalter Stoffstrom geteilt werden, bis diese Bedingung erfüllt ist. Ferner muß für eine Verschaltung am *Pinch* der Wärmekapazitätsstrom des heißen Stoffstromes kleiner oder gleich dem Wärmekapazitätsstrom des kalten Stoffstromes sein, da ansonsten die minimale Temperaturdifferenz in dem Wärmeübertrager unterschritten würde. Wird diese Bedingung für keine der möglichen Verschaltungen erfüllt, so wird normalerweise ein heißer Stoffstrom geteilt. Dabei ist darauf zu achten, daß die erste Restriktion weiterhin erfüllt wird, so daß gegebenenfalls mehrere Stromteilungen erforderlich sind. Für das Teilsystem unterhalb des *Pinch* kehren sich die Bedingungen genau um. Zusammengefaßt gilt für die Verschaltung am *Pinch*:

- | | | |
|------------|--|--|
| oberhalb: | - $N_h \leq N_k$, | sonst einen kalten Stoffstrom teilen |
| | - $(\dot{m}c_p)_h \leq (\dot{m}c_p)_k$, | sonst einen (normalerweise heißen) Stoffstrom teilen |
| unterhalb: | - $N_h \geq N_k$, | sonst einen heißen Stoffstrom teilen |
| | - $(\dot{m}c_p)_h \geq (\dot{m}c_p)_k$, | sonst einen (normalerweise kalten) Stoffstrom teilen |

Auf diese Weise wird ein Wärmeübertragernetzwerk entwickelt, das für maximale Energierückgewinnung und somit für minimalen Betriebsmitteleinsatz ausgelegt ist. In der Regel erreicht das entwickelte Netzwerk aber nicht das wirtschaftliche Optimum. Daher wird das komplizierte System durch Relaxationsschritte in ein einfacheres Netzwerk überführt.

Diese Vorgehensweise ist bei *Batch*-Prozessen prinzipiell in analoger Weise möglich. Im Vergleich zu den stationären Prozessen zeichnen sie sich dadurch aus, daß die Zeit als weitere Variable zu berücksichtigen ist. Wie bereits in Kapitel 2 beschrieben, lassen sich Wärmequellen und -senken von instationären Prozessen in diskrete Stoffströme des Typs A überführen, die allerdings nur zeitlich befristet dem Prozeß zur Verfügung stehen. Somit

läßt sich die *Pinch*-Methode für jedes einzelne Zeitintervall abarbeiten. Die für jede dieser Zeitscheiben entwickelten Netzwerke werden zu einem großen Gesamtnetzwerk mittels Superposition erstellt. Auf die Netzwerkentwicklung soll hier nicht weiter eingegangen werden. Anhand des Modellprozesses A wird die Bestimmung der Energieziele exemplarisch mittels Wärmekaskade geschildert (vgl. Abbildung 3.3). Die minimale Temperaturdifferenz beträgt $\Delta T_{min} = 10\text{ K}$.

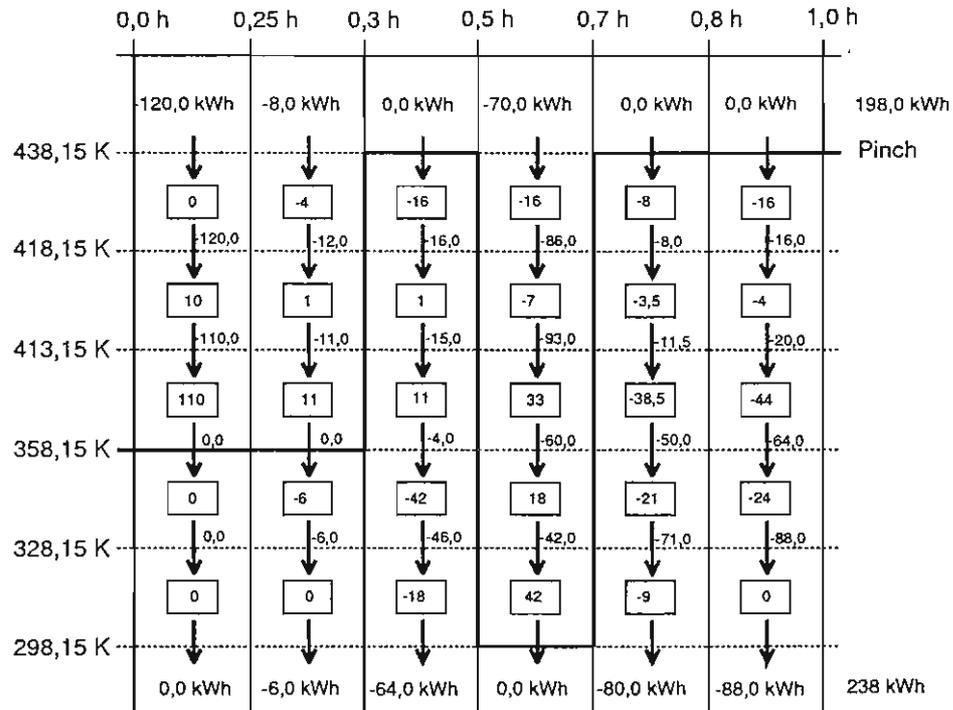


Abbildung 3.3: Wärmekaskade des *Batch*-Prozesses A

Es ist leicht zu ersehen, daß für jedes Zeitintervall die Wärmeintegrationsanalyse unabhängig voneinander durchgeführt wird. Der aufzuwendende minimale Heizbedarf ergibt sich aus der Summe der Kopfzeile zu einer Wärmemenge von $Q_{H,min} = 198,0\text{ kWh}$ und der minimale Kühlbedarf entsprechend aus der Summe der Fußzeile zu $Q_{K,min} = 238,0\text{ kWh}$. Die Generierung des Netzwerkes mit der maximalen Wärmeübertragung (MHX-Netzwerk) geschieht analog. Dabei ist zu beachten, daß die *Pinch*-Temperatur sich zeitlich ändert. In Abbildung 3.4 ist das resultierende MHX-Netzwerk dargestellt.

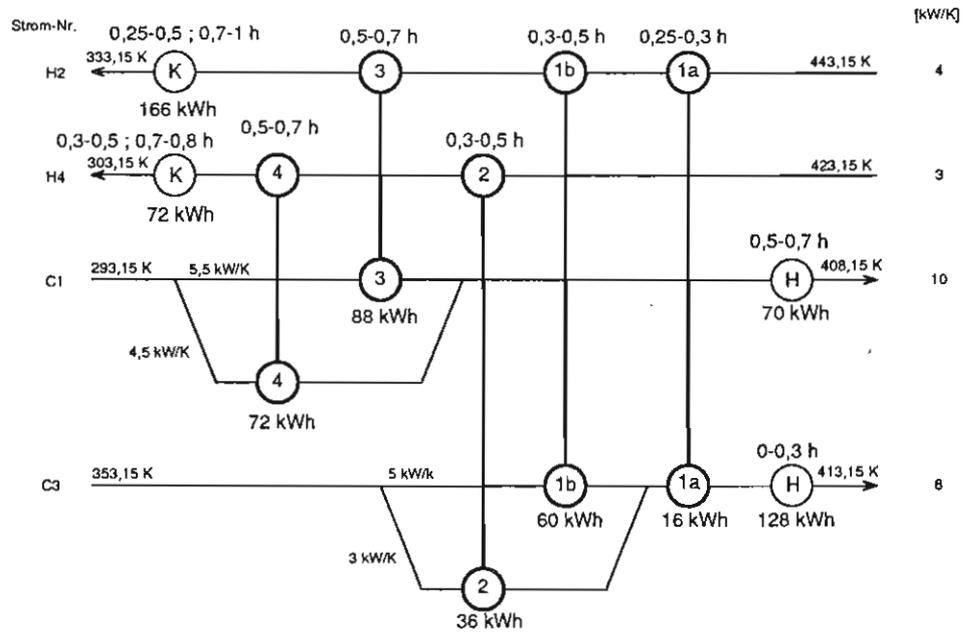


Abbildung 3.4: MXH-Netzwerk nach Pinch für Modellprozeß A

Das MXH-Netzwerk besteht aus insgesamt vier Wärmeübertragern, die eine Wärme von $Q_{W\ddot{U},max} = 272,0 \text{ kWh}$ prozeßintern transferieren. Zur Realisierung dieses Netzwerkes sind zwei Stromteilungen notwendig.

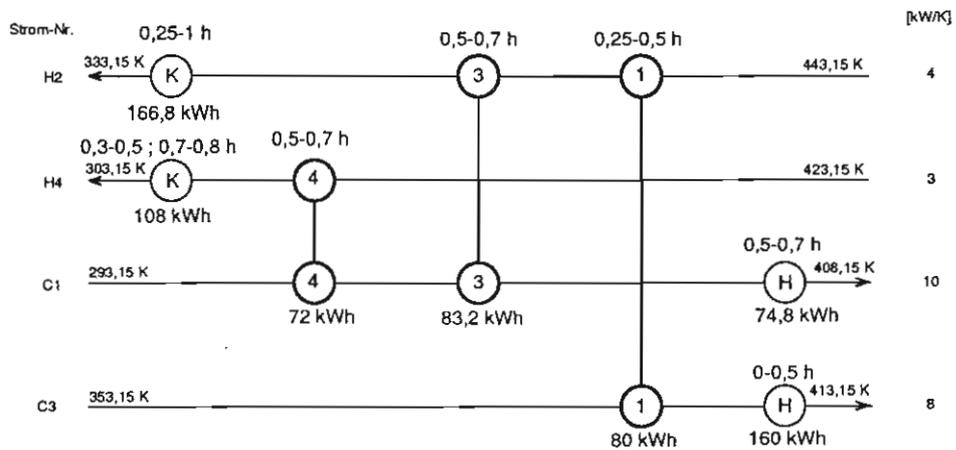


Abbildung 3.5: Netzwerk nach Relaxation von Modellprozeß A

Durch Relaxation läßt sich beispielsweise ein Netzwerk generieren, welches bestehend aus drei Wärmeübertragern eine Wärme von $Q_{W\ddot{U},relax} = 235,2 \text{ kWh}$ und somit nur noch rund 85 % der maximalen Wärme überträgt. Dazu sind dann keine Stromteilungen mehr notwendig, wie aus Abbildung 3.5 deutlich wird.

3.3 OMNIUM-Verfahren

Speziell für *Batch*-Prozesse entwickelten *T. Hellwig* und *E. Thöne* [4] OMNIUM, einen Algorithmus zur Wärmeintegration. Die Optimierungsaufgabe, welche diesem Verfahren zugrunde liegt, wird in ein Zuordnungsproblem transformiert, das nach der *ungarischen* Methode gelöst wird. Im Gegensatz zur *Pinch*-Analyse, steht bei OMNIUM die Netzwerkentwicklung im Vordergrund. Unter der Randbedingung, jeden Stoffstrom maximal nur einmal zu verschalten, wird die intern übertragbare Wärme maximiert. Dies führt zwangsläufig zu einem einfachen Netzwerk mit wenigen Wärmeübertragern. Das Verfahren besteht aus den Schritten

1. Aufstellen der Wärmematrix und
2. Lösen des Zuordnungsproblems durch die *ungarische* Methode.

Das Element $Q_{i,j}$ der Wärmematrix bezeichnet die übertragbare Wärmemenge, die vom heißen Strom i zum kalten Strom j transferiert werden kann. Diese berechnet sich aus dem übertragbaren Wärmestrom $\dot{Q}_{i,j}$ und der gemeinsamen Verfügbarkeit $\Delta\tau_{i,j}$ zu

$$Q_{i,j} = \dot{Q}_{i,j} \cdot \Delta\tau_{i,j}. \quad (3.6)$$

Der Wärmestrom $\dot{Q}_{i,j}$ läßt sich durch eine Energiebilanz unter Berücksichtigung einer minimal zulässigen Temperaturdifferenz bestimmen. Das Zuordnungsproblem von ih heißen und ik kalten Strömen wird nun dadurch definiert, bei einer Maximierung der Wärmemenge $Q_{W\ddot{U}}$ jeden Strom nur maximal einmal zu verschalten. Mathematisch bedeutet das:

$$Q_{W\ddot{U}} = \sum_{n=1}^{nmax} Q_{i(n),j(n)} = max! \quad , \quad (3.7)$$

mit $nmax = Max(ih, ik)$ als die maximale Anzahl der Wärmeübertrager, $i(n)$ als den Index des heißen Stromes für den n -ten Wärmeübertrager und analog $j(n)$ als Index des kalten Stromes für den n -ten Wärmeübertrager. Die Randbedingung, jeden Strom nur maximal einmal zu verschalten, fordert:

$$i(m) \neq i(k) \quad \wedge \quad j(m) \neq j(k), \quad \text{für alle } m, k = 1, \dots, nmax \text{ und } m \neq k. \quad (3.8)$$

Diese Aufgabe übernimmt die *ungarische* Methode. Anschaulich geht es darum, Elemente mit der größt möglichen Summe zu finden, ohne eine Spalte oder eine Zeile zweimal zu verwenden.

Analog zur *Pinch*-Methode soll das OMNIUM-Verfahren auf den Modellprozeß A mit einer minimalen Temperaturdifferenz von $\Delta T_{min} = 10 \text{ K}$ angewandt werden. Zur Bestimmung der Wärmematrix wird zunächst der übertragbare Wärmestrom $Q_{H2,C1}$ zwischen heißem Strom *H2* und kaltem Strom *C1* ermittelt. Der heiße Strom hat ein Abwärmepotential von $\dot{Q}_h = 440 \text{ kW}$. Diesen Betrag kann der kalte Strom vollständig aufnehmen. Somit wird $\dot{Q}_{H2,C1} = \dot{Q}_h$. Die gemeinsame Verfügbarkeit beschränkt sich auf das Zeitintervall $\tau \in [0,5; 0,7]$. Das entsprechende Wärmemengenelement berechnet sich daher zu

$$Q_{H2,C1} = 88 \text{ kWh}. \tag{3.9}$$

Die Berechnung der restlichen Elemente führt zur Gesamtmatrix,

$$Q = \begin{bmatrix} 88 & 80 \\ 72 & 36 \end{bmatrix}. \tag{3.10}$$

Das Zuordnungsproblem kann in diesem 4-Stoffsystem intuitiv gelöst werden. Es werden dazu die Wärmeübertrager zwischen Strom *C3* und *H2* sowie zwischen *C1* und *H4* gesetzt. Das Verfahren liefert also ein Netzwerk, bestehend aus zwei Wärmeübertragern, die insgesamt $Q_{WÜ,OMNIUM} = 152 \text{ kWh}$ übertragen. Das Netzwerk, wie es in Abbildung 3.6 zu sehen ist, liefert folglich nur knapp 56 % der aus der *Pinch*-Methode bekannten Wärme.

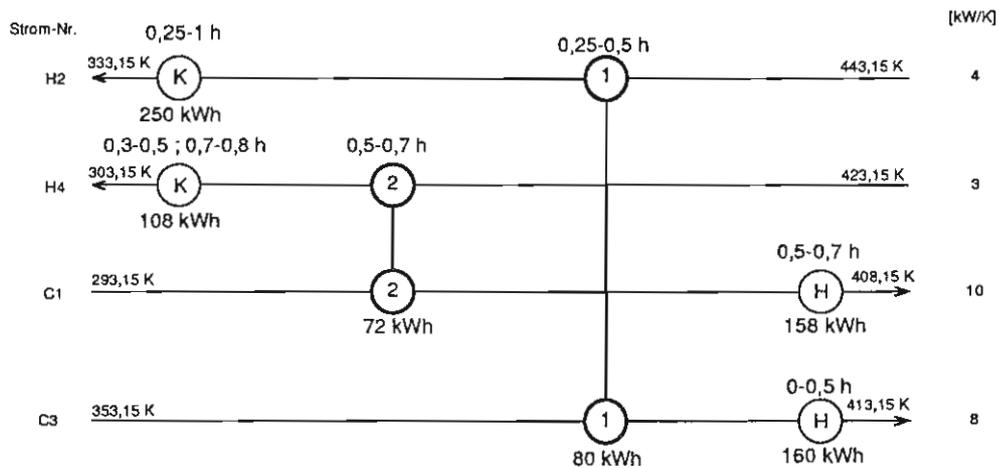


Abbildung 3.6: OMNIUM-Netzwerk für Modellprozeß A

Im Vergleich zum *Pinch*-Netzwerk ist vor allem ein großer Wärmestrom zwischen *H2* und *C1* ungenutzt. Dies ist auf die Forderung des OMNIUM-Verfahrens zurückzuführen, Ströme kein zweites Mal zu verschalten. Die thermodynamischen Energieziele sind aus dieser Methode nicht ersichtlich. Diesen Nachteil des OMNIUM-Verfahrens gegenüber der *Pinch*-Methode steht allerdings der Vorteil einfacher Netzwerke gegenüber.

Kapitel 4

Methodenentwicklung

Das Modellbeispiel A, das sowohl mit der *Pinch*-Methode als auch mit OMNIUM untersucht wurde, zeigt bereits grundsätzliche Vor- und Nachteile der Verfahren auf. Ein weiterer Vergleich der Verfahren am Modellbeispiel B verdeutlicht die unterschiedlichen Merkmale der Methoden. In Tabelle 4.1 sind die wichtigsten Ergebnisse (vgl. [13]) für beide Prozesse zusammengestellt.

Netzwerk	Heizbedarf in [kWh]	Kühlbedarf in [kWh]	übertragene Wärme in [kWh]	Wärmeüber- trager
Prozeß A				
MHX	198,0	238,0	272,0	4
Relaxation	234,8	274,8	235,2	3
OMNIUM	358,0	318,0	152,0	2
Prozeß B				
MHX	6405	1605	11595	7
Relaxation	6960	2160	11040	5
OMNIUM	8400	3600	9600	3

Tabelle 4.1: Zusammenstellung der Ergebnisse von Modellprozeß A und B

Die Tabelle stellt den Heiz- und Kühlbedarf, die übertragene Wärme und die Anzahl der Wärmeübertrager der einzelnen Prozesse dar. Im Gegensatz zu anderen Arbeiten auf diesem Gebiet werden die Anzahl der Kühler und Heizer der verschiedenen Netzwerke nicht berücksichtigt. Der Grund dafür ist, daß die Wärmeintegration bei *Batch*-Prozessen zu rein additiven Maßnahmen führt und somit keine Heiz- bzw. Kühleinrichtung vollständig durch Wärmeübertrager substituiert werden kann. Ergänzend zu Tabelle 4.1 werden in Abbildung 4.1 die zugehörigen Netzwerke von Prozeß B gegenübergestellt.

Trotz der geringen Stromzahl zeigt sich, daß zur Realisierung des MHX-Zieles eine Vielzahl von Wärmeübertragern eingesetzt werden muß. Die Relaxation vom MHX-Netzwerk zu einem wirtschaftlich sinnvollen Netzwerk zeigt die mittlere Zeichnung von Abbildung 4.1. Es gelingt in diesem Falle, mit einem reduzierten Satz fünf Wärmeübertragern etwa 95 % der maximal möglichen internen Wärmeübertragung abzudecken. Das OMNIUM-Verfahren liefert hingegen ein Netzwerk mit nur drei Wärmeübertragern bei immerhin 83 % der maximal möglichen internen Wärmeübertragung. Dabei entsprechen die gefundenen Wärmeübertrager den Wärmeübertragern 2, 3 und 6 des relaxierten Netzwerkes. Der fehlende Schritt vom OMNIUM-Netzwerk zum relaxierten Netzwerk ist bei diesem Prozeß die fehlende Ausnutzung der Restwärme von Strom $AQ2$ und $AQ3$. Eine weitere Verschaltung dieser Ströme, die in OMNIUM nicht vorgesehen ist, würde zu den Wärmeübertragern 4 und 7 des relaxierten Netzwerkes führen. Durch ein erneutes Anwenden des OMNIUM-Verfahren auf diese Restwärmeströme kann daher das relaxierte Netzwerk generiert werden. Auf diese Weise läßt sich eine zusätzliche Wärmemenge von 1440 kWh prozeßintern übertragen. Eine darüber hinaus gehende Nutzung der verbleibenden Abwärme aus dem relaxierten Netzwerk ist jedoch nicht möglich. Das MHX-Ziel bleibt somit für das rekursiv angewandte OMNIUM-Verfahren aufgrund zu hoher Exergieverluste des Wärmeübertragers 3, der eine Wärme von 4800 kWh mit einer konstanten Temperaturdifferenz von 50 K überträgt, unerreichbar. Sowohl in Prozeß A als auch in Prozeß B dient zur Generierung der MHX-Netzwerke unter anderem die *Parallelisierung*, also die Stromteilung auf gleich große Wärmekapazitätsströme. Dies geschieht für Prozeß A im Wärmeübertrager 2 und für Prozeß B in Wärmeübertrager 5. In diesen Wärmeübertragern findet der Wärmetransfer bei der konstanten minimalen Temperaturdifferenz von 10 K , also mit minimalem Exergieverlust, statt. Mit Hilfe dieser beiden Grundgedanken der

- Ausnutzung des Restwärmepotentials sowie der
- *Parallelisierung* der Ströme

sollte es daher möglich sein, das OMNIUM-Verfahren so zu erweitern, daß eine beliebige Annäherung an das MHX-Ziel gefunden wird. Auch wenn im zeitlichen Ablauf des entwickelten Verfahrens die *Parallelisierung* der Ströme der Ausnutzung des Restwärmepotentials vorausgeht, so ist doch die rekursive Anwendung von OMNIUM auf die Restwärmematrix der wesentliche Schritt des neuen Verfahrens. Die *Parallelisierung* sichert eine minimale Exergievernichtung bei jeder Verschaltung, allerdings um den Preis einer zunehmenden Komplexität des Netzwerkes.

4.1 Restwärmepotential

Das ursprüngliche OMNIUM-Verfahren basiert auf dem Gedanken, mit einer einfachen Verschaltung von Wärmeübertragern einen möglichst großen Wärmestrom zu übertragen. Dazu wird eine Wärmematrix aufgestellt, deren Elemente $Q_{i,j}$ die über die gesamte Prozeßzeit betrachtete übertragbare Wärmemenge zwischen je einem heißen Strom i und einem kalten Strom j enthalten. Die *ungarische* Methode maximiert die Summe der übertragbaren Wärme unter der Bedingung, jeden Stoffstrom maximal nur einmal zu verschalten. Das auf diese Weise generierte Netzwerk läßt Restwärmeströme ungenutzt, die sich aus der Art der Verschaltung ergeben. Mit den resultierenden Restwärmeströmen wird eine neue Matrix nutzbarer Abwärme aufgestellt, mit Hilfe derer weitere Verschaltungen bestimmt werden können. Dieser rekursive Vorgang wird so lange durchlaufen, bis keine weitere Wärme mehr übertragen werden kann. Zusammenfassend läßt sich dieser Algorithmus in die folgenden Schritte aufschlüsseln:

1. Einlesen der Prozeßdaten
2. Berechnung der Wärmematrix
3. Lösen des Zuordnungsproblem (Maximierung der Wärmemenge)
4. Bestimmung des Netzwerkes und der Restwärmeströme
5. Wiederholung der Punkte 2 bis 4, bis keinen Wärme mehr übertragen werden kann
6. Ausgabe der Ergebnisse

Die Prozeßdaten sollten die in Abschnitt 2.4 beschriebenen Größen enthalten. Daraus lassen sich die übertragbaren Wärmeströme sowie die übertragbaren Wärmemengen zwischen je zwei Stoffen berechnen. Die Wärmematrix kann mit Gewichtungsfaktoren versehen sein, die sich z.B. aus den Standorten oder aus der Stoffpaarung einer Verschaltung ergibt. Stoffe, die nicht miteinander verschaltet werden sollen, erhalten einen Gewichtungsfaktor von $g_{i,j} = 0$. Unbedenkliche Verschaltungen werden standardmäßig auf $g_{i,j} = 1$ gesetzt. Die Elemente der gewichteten Wärmematrix ergeben sich somit zu

$$a_{i,j} = g_{i,j} \cdot Q_{i,j}. \quad (4.1)$$

Die Lösung des Zuordnungsproblem erfolgt bei OMNIUM durch die *ungarische* Methode. Sie findet das Maximum der übertragbaren Wärme für eine gegebene Wärmematrix. Bei der

rekursiven Anwendung der Methode ergeben sich komplizierte Netzwerke. Allerdings kann diese Methode durch einen anderen simplen Algorithmus substituiert werden, der jeweils nur die $k_{WÜ}$ größten Wärmeübertrager wählt und die verbleibenden Verschaltungen kleiner Übertragungsmengen nicht beachtet.

4.2 Verschaltungsmöglichkeiten zweier Ströme

Das OMNIUM-Verfahren berechnet jeweils die maximal übertragbaren Wärmemengen zwischen je einem kalten und einem heißen Strom. Aus den betrachteten MHX-Netzwerken der Beispielprozesse wird aber ersichtlich, daß aufgrund der *Pinch*-Problematik die Wahl einer maximalen Wärmeübertragung zwischen einem Stoffpaar zu einer unnötigen Exergievernichtung führen kann. Eine sichere Methode zur Vermeidung von *Pinch*-Verletzungen und somit gleichzeitig von unnötiger Exergievernichtung ist die Aufteilung des Systems in ein Subsystem oberhalb des *Pinch* und ein Subsystem unterhalb des *Pinch* sowie die Beachtung der *Pinch*-Regeln. Dies ist das wesentliche Merkmal der *Pinch*-Technik. Da der *Pinch* bei instationären Prozessen jedoch zeitlich variiert, führt die konsequente Aufteilung der Systeme zwangsläufig zu komplizierten Netzwerken. Die Weiterentwicklung von OMNIUM über die Nutzung der Restwärme hinaus sollte daher nicht in dieser Richtung verlaufen.

Bei der Weiterentwicklung von OMNIUM werden zunächst die verschiedenen Möglichkeiten der Verschaltung zur Übertragung der maximalen Wärme zwischen einem Stoffpaar betrachtet. Mit diesen Möglichkeiten sind unterschiedliche Größen des praktisch unvermeidbaren Exergieverlustes verbunden. Diese Betrachtung führt auf die Methode der *Parallelisierung*, die die Wärmeübertragung einschränkt und somit zu einer geänderten Berechnung der Wärmematrix führt.

4.2.1 Übertragung maximaler Wärme

Die maximal übertragbare Wärme zwischen einem kalten und einem heißen Strom kann durch die Energiebilanz eines Gegenstromwärmeübertragers bestimmt werden. Eine geeignet gewählte minimal zulässige Temperaturdifferenz ΔT_{min} gewährleistet den wirtschaftlichen Einsatz. Dabei sind unterschiedliche Verschaltungen möglich. Es wird zunächst eine Verschaltung betrachtet, bei der die Temperaturen, mit denen die Ströme in den Wärmeübertrager eintreten, denjenigen Temperaturen entsprechen, mit denen die Ströme

in das Gesamtsystem eintreten, also

$$(T_k)_{ein,W\ddot{U}} = (T_k)_{ein} \text{ und} \quad (4.2)$$

$$(T_h)_{ein,W\ddot{U}} = (T_h)_{ein}. \quad (4.3)$$

Aus der Randbedingung, daß die Temperatur des heißen Stromes an jeder Stelle um ΔT_{min} höher liegen muß als die Temperatur des kalten Stromes, ergibt sich für die maximal zulässige Austrittstemperatur des kalten Stromes aus dem Wärmeübertrager:

$$(T_k)_{aus,W\ddot{U},\underline{max}} = MIN \{(T_k)_{aus}; (T_h)_{ein} - \Delta T_{min}\}. \quad (4.4)$$

Temperaturen mit dem Index $_{W\ddot{U}}$ beziehen sich stets auf den Wärmeübertrager, ohne Index jeweils auf den Prozeß. Analog gilt für die minimale Austrittstemperatur des heißen Stromes aus dem Wärmeübertrager:

$$(T_h)_{aus,W\ddot{U},\underline{min}} = MAX \{(T_h)_{aus}; (T_k)_{ein} + \Delta T_{min}\}. \quad (4.5)$$

Die Energiebilanz schränkt die erreichbaren Temperaturen nun weiter durch die Bedingung ein, daß bei adiabater Wärmeübertragung die abgegebene Wärme des heißen Stromes gleich der vom kalten Strom aufgenommenen Wärme sein muß. Die maximal übertragbare Wärmestrom ist daher der kleinere Wert aus dem Abwärmepotential des heißen Stromes,

$$\dot{Q}_{h,max} = (\dot{m}c_p)_h \cdot [(T_h)_{ein} - (T_h)_{aus,W\ddot{U},\underline{min}}], \quad (4.6)$$

und dem Wärmebedarf des kalten Stromes,

$$\dot{Q}_{k,max} = (\dot{m}c_p)_k \cdot [(T_k)_{aus,W\ddot{U},\underline{max}} - (T_k)_{ein}], \quad (4.7)$$

und ergibt sich zu:

$$\dot{Q}_{W\ddot{U},max} = MIN \{\dot{Q}_{h,max}; \dot{Q}_{k,max}\}. \quad (4.8)$$

Die Austrittstemperaturen der beiden Ströme aus dem Wärmeübertrager berechnen sich zu

$$(T_k)_{aus,W\ddot{U}} = (T_k)_{ein} + \frac{\dot{Q}_{max,W\ddot{U}}}{(\dot{m}c_p)_k} \text{ und} \quad (4.9)$$

$$(T_h)_{aus,W\ddot{U}} = (T_h)_{ein} - \frac{\dot{Q}_{max,W\ddot{U}}}{(\dot{m}c_p)_h}. \quad (4.10)$$

Im Hinblick auf eine exergetische Optimierung zeigt sich, daß die durch diese Beziehungen definierte Verschaltung in der Regel die ungünstigste ist. Abbildung 4.2 verdeutlicht dies zusammen mit der Darstellung von zwei weiteren möglichen Verschaltungen im T, \dot{H} -Diagramm.

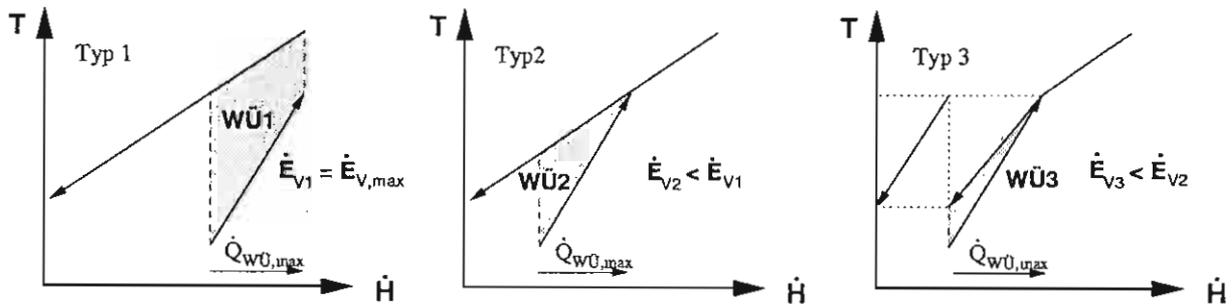


Abbildung 4.2: Verschaltungsmöglichkeiten mit maximaler Wärme

In den drei Fällen wird jeweils der gleiche Wärmestrom übertragen. Die Wärmeübertrager werden durch die schraffierten Flächen repräsentiert, wodurch sich die Ein- und Austrittstemperaturen der Ströme ablesen lassen. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß die Temperaturen des kalten Stromes um die geforderte minimale Temperaturdifferenz ΔT_{min} erhöht wurden. Bei den betrachteten Bedingungen liefert der heiße Strom mehr nutzbare Abwärme als zum Aufheizen des kalten Stromes notwendig sind. Die linke Verschaltung entspricht der nach Gleichungen 4.2 bis 4.10. Die Ströme werden ohne Vorwärmung bzw. Vorkühlung in den Wärmeübertrager geleitet. Diese Verschaltung wird mit Typ 1 bezeichnet. Nach der Wärmeübertragung erfordert der heiße Strom eine weitere Kühlung bzw. hat ein weiteres Abwärmepotential, allerdings auf niedrigem Temperaturniveau. Die erforderliche Aufheizung des kalten Stroms läßt sich aber auch durch die mittlere Verschaltung vom Typ 2 realisieren. Da der heiße Wärmekapazitätsstrom größer ist als der kalte, also $(\dot{m}c_p)_h \geq (\dot{m}c_p)_k$, liegt der *Pinch* am heißen Ende des Wärmeübertragers. Der heiße Strom kann daher mit einer Temperatur in den Wärmeübertrager geleitet werden, die gerade um die minimale Temperaturdifferenz oberhalb der Austrittstemperatur des kalten Stromes liegt, also $(T_h)_{ein,WÜ} = (T_k)_{aus,WÜ} + \Delta T_{min}$. Der Exergieverlust bei der Wärmeübertragung ist in etwa proportional zur schraffierten Fläche und somit beim Typ 2 in diesem Falle deutlich kleiner als beim Typ 1. In Übereinstimmung damit stehen noch zwei weitere Restströme zur Verfügung, deren Abwärmepotential zwar quantitativ dem des Restwärmestroms nach Typ 1 entspricht, jedoch exergetisch hochwertiger ist. Schließlich ermöglicht eine Stromteilung des Stroms mit dem größeren Wärmekapazitätsstrom eine weitere Reduktion des Exergieverlustes, wie im rechtem Diagramm der Abbildung dargestellt. Diese Verschaltung des Typs 3 teilt den Wärmekapazitätsstrom so, daß der geforderte maximale Wärmestrom

gerade noch übertragen werden kann. Die geringere Exergieentwertung ist außer an der kleineren schraffierten Fläche auch daran zu erkennen, daß der kältere Reststrom nun eine höhere Anfangstemperatur als der vergleichbare Strom des Typs 2 besitzt.

Mit der Verringerung des Exergieverlustes geht eine Erhöhung der Investitionskosten für die Wärmeübertrager einher. So kann ein Wärmeübertrager nach Typ 1 bei großen Temperaturdifferenzen mit relativ kleinen Flächen den geforderten Wärmestrom transferieren. Dahingegen benötigt der Wärmeübertrager nach Typ 3 eine erheblich größere Fläche und führt auch zu komplizierteren Verschaltungen wegen der Stromteilungen und der größeren Anzahl von Restströmen.

4.2.2 Parallelisierung

Die im vorherigen Abschnitt aufgezeigte Verschaltung vom Typ 3 minimiert den Exergieverlust unter der Randbedingung, daß die maximale Wärme von einem Stoff zum anderen übertragen wird. Unter dieser Randbedingung kann sich, auch bei einer exergetisch günstigen Verschaltung nach Typ 3, ein sehr hoher Exergieverlust ergeben, z.B. wenn die Temperaturniveaus zwischen Abwärmequelle und Wärmesenke auf sehr unterschiedlicher Höhe liegen. Es wird bei der Auswahl der zu verschaltenden Stoffpaare keine Rücksicht auf die Exergieverluste in den Wärmeübertragern genommen. Das Ergebnis ist somit suboptimal, sofern Verschaltungen mit geringeren Exergieverlusten dadurch ausgeschlossen werden. Exergetisch günstigere Verschaltungen sind grundsätzlich dann möglich, wenn die Temperaturbereiche sich überschneiden. Diese Überschneidungen werden bei der *Parallelisierung* zur exergetischen Optimierung genutzt. Es wird also nicht mehr die maximal übertragbare Wärme von einem heißen auf einen kalten Strom berechnet, sondern die Wärme, die unter minimaler Exergievernichtung übertragen werden kann. Das gemeinsame Temperaturintervall $T \in [T_u, T_o]$ setzt sich zusammen aus der unteren Grenze,

$$T_u = \text{MAX} \{ (T_h)_{aus}; (T_k)_{ein} + \Delta T_{min} \}, \quad (4.11)$$

und der oberen Grenze,

$$T_o = \text{MIN} \{ (T_h)_{ein}; (T_k)_{aus} + \Delta T_{min} \}. \quad (4.12)$$

Die *Parallelisierung* besteht nun aus Stromteilung des Stromes mit der größeren Wärmekapazität in einen Strom mit genau der Wärmekapazität des kleinen Stromes und einen

Reststrom. Die Ströme mit derselben Wärmekapazität haben im T, \dot{H} -Diagramm die gleiche Steigung, d.h. sie verlaufen parallel. Der übertragbare Wärmestrom berechnet sich zu

$$\dot{Q}_{W\ddot{U},P} = \text{MIN} \{ (\dot{m}c_p)_h ; (\dot{m}c_p)_k \} \cdot [T_o - T_u]. \quad (4.13)$$

Aus der daraus entwickelten Wärmematrix der parallelisierten Ströme werden analog zur Wärmematrix der maximal übertragbaren Wärmemengen diejenigen Elemente bestimmt, die in der Summe die größte Wärme übertragen. Das Auswahlverfahren hat dabei keinen Einfluß auf die Exergieverluste bei der Wärmeübertragung, da der relative Exergieverlust bezogen auf die übertragene Wärmemenge stets der selbe ist und ausschließlich von der minimalen Temperaturdifferenz ΔT_{min} vorgegeben wird. Der Wärmetransfer in einem *parallelisierten* Wärmeübertrager ist für das obige Beispiel in Abbildung 4.3 rechts dargestellt.

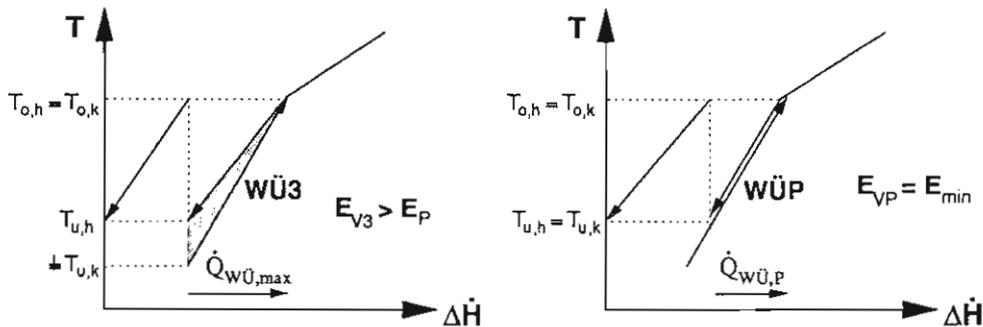
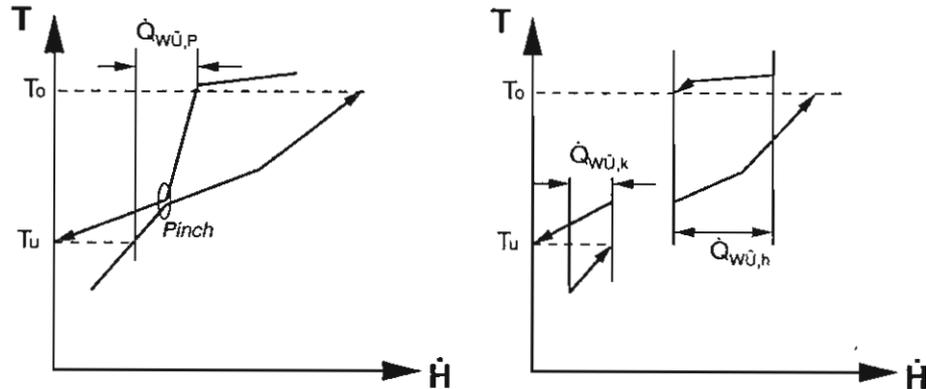


Abbildung 4.3: Parallelisierter Wärmeübertrager

Wie in der Abbildung zu sehen, wird nun nicht mehr die maximal mögliche Wärme übertragen, sondern nur der Teil, der sich mit minimaler Temperaturdifferenz übertragen läßt. Im Vergleich zur Verschaltung nach Typ 3 (links) wird der Exergieverlust nochmals verringert. Die Anzahl der Restströme nimmt hingegen zu, da jetzt noch ein kalter Strom bei niedriger Temperatur aufgeheizt werden muß.

Der Vorgang der *Parallelisierung* ist ebenfalls im T, \dot{H} -Diagramm der Summenkurven deutlich zu erkennen. Die Diagramme vor und nach vollständiger *Parallelisierung* sind in Abbildung 4.4 zu sehen. Das betrachtete System beinhaltet einen Temperaturbereich, in dem sowohl heiße Ströme als auch kalte Ströme auftreten. Nur in diesem Bereich kann Wärme mit minimalem Exergieverlust durch *Parallelisierung* übertragen werden. Diese übertragbare Wärme $\dot{Q}_{W\ddot{U},P}$ ist begrenzt durch den *Pinch* des Systems. Werden nun alle *parallelisierten* Verschaltungen miteinander verknüpft, so entsteht das rechte Diagramm, in dem sich

Abbildung 4.4: Summenkurven nach *Parallelisierung*

zwei Subsysteme von heißen und kalten Summenkurven gebildet haben: Eines oberhalb des *Pinch* und eines unterhalb des *Pinch*. Das restliche Abwärmepotential ist dementsprechend gesplittet und kann ohne Verletzung der *Pinch*-Regeln verschaltet werden. Dazu muß sichergestellt werden, daß beispielsweise ein heißer Strom des oberen Subsystems nicht mit einem kalten Strom des unteren Subsystems verschaltet wird. Dies würde eine Wärmeübertragung über den *Pinch* bedeuten und kann daher nicht zum MHX-Netzwerk führen. Die *ungarische* Methode wird in dem dargestellten Fall mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Verschaltung ohne *Pinch*-Verletzung finden, da diese Methode immer die in der Summe beste Lösung sucht. Das entspricht in diesem Fall der Summe der übertragbaren Wärmeströme aus oberem Subsystem $\dot{Q}_{WÜ,h}$ und unterem Subsystem $\dot{Q}_{WÜ,k}$. Ausgeschlossen sind *Pinch*-Methode jedoch im allgemeinen nicht. Ein sauberes Trennen der Subsysteme ist durch die Verwendung der Gewichtungsfaktoren algorithmisch möglich, d.h. der Gewichtungsfaktor von zwei Strömen des gleichen Subsystem wird zu $g_{i,j}^- = 1$ und der Gewichtungsfaktor von zwei Strömen unterschiedlicher Subsysteme wird zu $g_{i,j}^+ = 0$. Zur eindeutigen Zuordnung der Ströme zu den Systemen ist die Kenntnis über die *Pinch*-Temperatur jedes Zeitintervalls notwendig. Diese Temperaturen werden in dem hier entwickelten Verfahren jedoch nicht explizit berechnet. Daher wird hier eine vereinfachte Lösung zur Vermeidung von *Pinch*-Verletzungen bei der Verschaltung der Restwärmeströme vorgeschlagen. Als Kenngröße für eine exergetisch sinnvolle Verschaltung dient die Temperaturdifferenz bei der Wärmeübertragung. Je geringer diese Temperaturdifferenz ist, desto geringer ist der Exergieverlust. Wie aus dem rechten Teil von Abbildung 4.4 zu erkennen, kann es nach vollständiger *Parallelisierung* keinen gemeinsamen Temperaturbereich mehr für die heißen und kalten Summenkurven geben. Die Temperaturdifferenz ΔT_{hk} zwischen Austrittstemperatur eines heißen Stromes $(T_h)_{aus}$ und der eines kalten Stromes $(T_k)_{aus}$ liegt für Ströme des gleichen Subsystems bei $\Delta T_{hk}^- > 0$. Entspricht der heiße Strom dem unteren System

und der kalte Strom dem oberen System, kann keine Wärme übertragen werden. Dieser Fall braucht im weiteren Verlauf also nicht berücksichtigt werden. Im umgekehrten Fall, also einem heißen Strom des oberen Subsystem und einem kalten Strom des unteren System, würde eine Verschaltung zu einem Wärmetransfer über den *Pinch* führen. Für diese Verschaltung ist die Temperaturdifferenz ΔT_{hk}^\neq wesentlich größer als die Temperaturdifferenz $\Delta T_{hk}^=$ zweier Ströme des selben Subsystems. Daraus folgt,

$$1/\Delta T_{hk}^= \gg 1/\Delta T_{hk}^\neq. \quad (4.14)$$

Verwendet man nun diesen Kehrwert der Differenzen von Austrittstemperaturen eines heißen Stromes i und eines kalten Stromes j bzw. eine beliebig hohe Potenz diese Wertes als Gewichtungsfaktor $g_{i,j}$, dann werden Wärmeübertragungen über den *Pinch* vermieden.

4.2.3 Restwärmeströme

Die drei Typen für die Verschaltungen mit maximal übertragbarer Wärme und die *Parallelisierung* konnten algorithmisiert und für alle Fälle verallgemeinert werden. Als Ergebnis der Verschaltung wird jeder Wärmeübertrager $iwue$ mit folgenden Kenngrößen spezifiziert:

$(n_{h,W\ddot{U}})_{iwue}$	\equiv	Ident.nr. des heißen Stroms
$(n_{k,W\ddot{U}})_{iwue}$	\equiv	Ident.nr. des kalten Stroms
$(\dot{Q}_{W\ddot{U}})_{iwue}$	\equiv	Wärmestrom [kW]
$(Q_{W\ddot{U}})_{iwue}$	\equiv	Wärmemenge [kWh]
$(\tau_{a,W\ddot{U}})_{iwue}$	\equiv	Anfangszeit der Wärmeübertragung
$(\tau_{e,W\ddot{U}})_{iwue}$	\equiv	Endzeit der Wärmeübertragung
$(T_{o,h})_{iwue}$	\equiv	obere = Eintrittstemperatur des heißen Stromes
$(T_{o,k})_{iwue}$	\equiv	obere = Austrittstemperatur des kalten Stromes
$(T_{u,h})_{iwue}$	\equiv	untere = Austrittstemperatur des heißen Stromes
$(T_{u,k})_{iwue}$	\equiv	untere = Eintrittstemperatur des kalten Stromes

Diese Daten beinhalten alle erforderlichen Informationen für den Ablauf des Verfahrens. Bei Stromteilungen nach Typ 3 oder der *Parallelisierung* läßt sich der erforderliche Wärmekapazitätsstrom aus dem übertragenen Wärmestrom und den Temperaturen zu

$$(\dot{m}c_p)_{h,iwue} = \frac{(\dot{Q}_{W\ddot{U}})_{iwue}}{(T_{o,h})_{iwue} - (T_{u,h})_{iwue}} \quad (4.15)$$

bestimmen. Für den bei der Stromteilung verbleibende Reststrom ist die Wärmekapazität gleich der Differenz zwischen ursprünglicher und verschalteter Wärmekapazität, also $(\dot{m}c_p)_{h,Rest} = (\dot{m}c_p)_h - (\dot{m}c_p)_{h,iwue}$. Ein heißer Strom, der über einen Zeitraum von $\Delta\tau_h$ um eine Temperaturdifferenz ΔT_h abzukühlen ist, besitzt ein Abwärmepotential von $Q_h = (\dot{m}c_p)_h \cdot \Delta T_h \cdot \Delta\tau_h$. Dieses Potential läßt sich daher als Fläche im T, τ -Diagramm darstellen. Die Verschaltung mit einem kalten Strom durch einen Wärmeübertrager im Zeitintervall $[\tau_{a,WÜ} ; \tau_{e,WÜ}]$ kühlt den heißen Strom von $T_{ein,WÜ}$ auf $T_{aus,WÜ}$ ab. Diese Verschaltung läßt sich ebenfalls im selben Diagramm darstellen und führt zu der Stromaufteilung, wie sie in Abbildung 4.5 zu sehen ist.

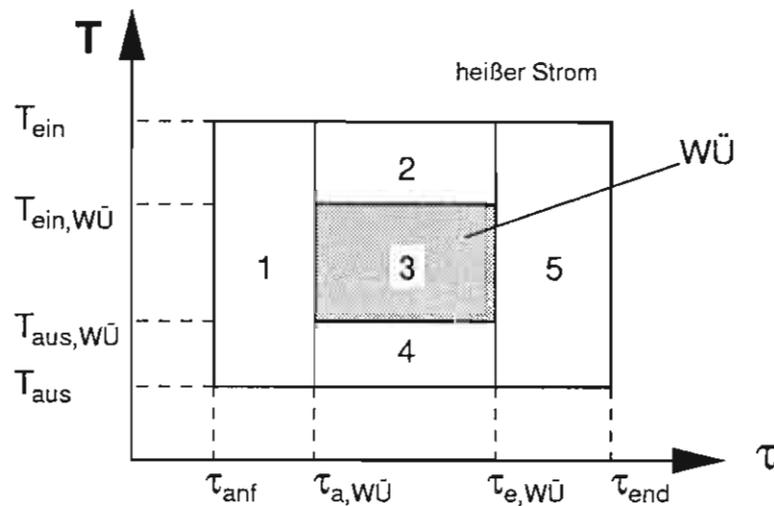


Abbildung 4.5: Aufteilung der Restwärme

Insgesamt kann es zu maximal fünf Restströmen kommen. Reststrom 1 ist dabei der Strom, der in dem Zeitraum vor der Wärmeübertragung vorliegt. Er fließt also in dem Zeitintervall $[\tau_{anf} ; \tau_{a,WÜ}]$ und ist noch über den gesamten Temperaturbereich abzukühlen. Ähnlich verhält es sich mit Strom 5, dem Strom, der, nach dem die Wärmeübertragung abgeschlossen ist, also im Zeitintervall $[\tau_{e,WÜ} ; \tau_{end}]$ abzukühlen ist. Die Ströme 2, 3 und 4 liegen im selben Zeitintervall wie die Wärmeübertragung. Sie entstehen dadurch, daß die Wärmeübertragung nicht ausreicht, den gesamten Strom in diesem Zeitraum abzukühlen. Strom 2 liegt in einem Temperaturbereich oberhalb der Wärmeübertragung (nur bei Verschaltungstypen 2 und 3 sowie bei der *Parallelisierung*), Strom 3 im Temperaturbereich der Wärmeübertragung (Reststrom bei der Stromteilung durch Verschaltungstyp 3 oder durch *Parallelisierung*) und Strom 4 in einem Temperaturbereich unterhalb der Wärmeübertragung.

4.2.4 Programm-Ablauf

Beim Einsatz des Optimierungsverfahrens hat der Anwender folgende Freiheitsgrade, wobei Durchgänge die nacheinander ablaufende und aufeinander aufbauende Optimierungsschritte mit jeweils neuen Netzwerken bezeichnen, vgl. Abschnitt 4.1. Es sind

- Restriktionen für Stoffpaarungen (Gewichtungsfaktor $g_{i,j}$),
- die Art des Auswahlverfahrens (*ungar* oder Top $k_{W\ddot{U}}$),
- die Anzahl der Durchgänge mit *Parallelisierung* i_P und
- die Anzahl der Durchgänge i_{max} mit maximal übertragbarer Wärme sowie mit den Verschaltungstypen 1, 2 oder 3,

Gemäß den Restriktionen für Stoffpaarungen werden im Programm die Gewichtungsfaktoren $g_{i,j}$ zu Null oder zu eins setzen. Bevor die Anzahl der Durchgänge mit *Parallelisierung*, i_P und die Anzahl der Durchgänge mit maximaler interner Wärmenutzung, i_{max} , unter Auswahl eines der 3 Verschaltungstypen festgelegt wird, hat der Anwender eine weitere Entscheidung bei der Art des Auswahlverfahrens der Wärmeübertrager zu treffen. Wie bereits erwähnt, ist die *ungarische* Methode nur optimal in Bezug auf einen Durchgang. Bei der rekursiven Nutzung der Restwärmen führt diese Methode zu komplizierten Netzwerken. Sie bestimmt eine feste Anzahl von Wärmeübertragern innerhalb jedes Durchgangs, obwohl viele Verschaltungen nur einen kleinen Beitrag zur intern übertragenen Wärme liefern. Ein alternatives Auswahlverfahren besteht darin, in jedem Durchgang die $k_{W\ddot{U}}$ größten Wärmeübertrager zu ermitteln. Im Extremfall ist $k_{W\ddot{U}} = 1$, so daß nur der Wärmeübertrager mit der größten Wärmemenge bestimmt wird. Aus den daraus resultierenden Restströmen wird erneut die Wärmematrix aufgestellt.

4.3 Bewertung der Verfahren

Das neu entwickelte Optimierungsverfahren hat auf Grund seiner Freiheitsgrade die Möglichkeit, unterschiedliche Netzwerke mit unterschiedlichen intern übertragenen Wärmemengen und unterschiedlicher Anzahl von Wärmeübertragern zu generieren. In der Regel ist eine höhere intern übertragene Wärmemenge mit höherer Komplexität des Wärmeübertragernetzwerkes verbunden. Vermiedene Exergieverluste sind dabei gegen höhere Investitions-

kosten abzuwägen. Als Kriterium für die exergetische Qualität eines Netzwerkes wird der exergetische Gütegrad Y eingeführt. Er ist definiert als

$$Y_{\text{Netz}} = \frac{\text{Übertragene Wärme bei betrachtetem Netzwerk}}{\text{Übertragene Wärme bei MHX - Netzwerk}} \quad (4.16)$$

Der exergetische Gütegrad bezieht sich auf das exergetisch optimierte Ergebnis der *Pinch*-Methode und kann maximal den Wert 1 annehmen. Als Kriterium für die Komplexität des Netzwerkes wird die Anzahl der Verschaltungen $n_{W\ddot{U}}$ zu Grunde gelegt.

4.3.1 Statistische Auswertung

Um einen Überblick über die Qualität der verschiedenen Optimierungsverfahren zu gewinnen, ist eine Vielzahl von typischen instationären Prozessen zu untersuchen. Eine systematische Vorgehensweise zur Generierung solcher Prozesse ist der Einsatz eines Zufallsgenerators. Nach Abschnitt 2.4 können in einem beliebig großem System alle Arten von Strömen unabhängig voneinander auftreten. Ein Strom ist definiert durch Ein- und Austrittstemperatur, Wärmekapazitätsstrom und Zeitintervall. Der zur statistischen Bewertung der Methoden entwickelte Zufallsgenerator generiert kalte und heiße Ströme in vorgegebener Anzahl mit gleichmäßiger Verteilung in normierten Temperatur-, Wärmekapazitätsstrom- und Zeitintervallen. Tabelle 4.2 zeigt die Ergebnisse verschiedener Verfahren für 1000 Zufallsprozesse mit je 5 kalten und 5 heißen Strömen. Alle Testreihen wurden dabei mit der *ungarischen* Methode als Auswahlverfahren für die Wärmeübertrager gerechnet.

Das Ergebnisprotokoll der Testreihen beinhaltet den durchschnittlichen Gütegrad \bar{Y} , den minimalen Gütegrad Y_{\min} , eine Häufigkeitsverteilung des Gütegrades sowie die durchschnittliche Anzahl der Verschaltungen $\bar{n}_{W\ddot{U}}$. Die Anzahl der Verschaltungen entspricht hier allerdings nicht der Anzahl der Wärmeübertrager, die in der Regel höher liegt, da Mehrfachverschaltungen in verschiedenen Zeitintervallen möglich sind. Die maximale Anzahl der Verschaltungen ist bei 5 heißen und 5 kalten Strömen auf $n_{W\ddot{U},\max} = 5 \times 5 = 25$ beschränkt. Die Testreihe A liefert die Ergebnisse des ursprünglichen OMNIUM-Verfahrens, also nur ein Durchgang nach Verschaltungstyp 1. Der durchschnittliche Gütegrad liegt bei ca. 75 % mit durchschnittlich 3,61 Wärmeübertragern. Das zeigt auf der einen Seite die Einfachheit des Netzwerkes, aber auf der anderen Seite das verbleibende Potential der Wärmeintegration. Das wird zusätzlich durch die Gütegradverteilung untermauert. Der Großteil der Prozesse erreicht einen Gütegrad von $Y \leq 80$ %. Die Testreihen B und C beziehen die Restwärme mit ein und ermöglichen damit Mehrfachverschaltungen. Ihre Ergebnisse unterscheiden sich aufgrund einer unterschiedlichen Wahl der Wärmeübertragung.

Nr.	\bar{Y} [%]	Y_{min} [%]	$Y = 100$ %	$Y > 95$ %	$Y > 90$ %	$Y > 80$ %	$\bar{n}_{WÜ}$
A	74,66	35,92	5	33	88	341	3,61
B	95,21	62,40	90	632	850	975	9,25
C	98,65	82,99	336	917	984	1000	9,94
D	99,40	85,18	440	981	997	1000	10,52
E	99,90	88,23	649	996	997	1000	11,96
F	100,00	100,00	1000	1000	1000	1000	12,07

A OMNIUM-Verfahren mit einem Durchgang

B Nutzung der Restwärme nach Verschaltungstyp 1

C Nutzung der Restwärme nach Verschaltungstyp 3

D *Parallelisierung* (1 Durchgang) und RW nach Verschaltungstyp 3

E *Parallelisierung* (5 Durchgänge) und RW nach Verschaltungstyp 3

F vollständige *Parallelisierung* mit RW nach Verschaltungstyp 3 und Trennung der Subsysteme

Tabelle 4.2: Ergebnisprotokoll: 1000 Prozesse mit je 5 heißen und 5 kalten Strömen

Während in der Testreihe B nur Wärmeübertragungen des Typs 1 ohne Stromteilung verwendet werden, kommen in der Testreihe C Verschaltungen des Typs 3 mit Stromteilung zum Einsatz. Wie erwartet, liegt der Gütegrad dieser Testreihen deutlich höher als der des OMNIUM-Verfahrens. Die Verbesserung des Gütegrades ist allerdings mit einem erheblichen Mehraufwand an Verschaltungen verbunden. Ein Vergleich zwischen Testreihe B und C zeigt nicht nur eine Verbesserung des durchschnittlichen Gütegrades von 95 % auf gut 98 %, sondern vor allem die deutliche Anhebung des minimalen Gütegrades. Der Zuwachs an Netzwerkkomplexität beim Übergang von B zu C scheint mit einem Anstieg der durchschnittlichen Anzahl der Verschaltungen von 9,25 zu 9,94 hingegen bescheiden auszufallen. Der reale Zuwachs der Komplexität ist durch diese Größen allerdings nicht voll ersichtlich. Er besteht vor allem in den Stromteilung der Testreihe C. Eine weitere Verbesserung des exergetischen Gütegrades hin zu MHX-Netzwerken wird durch die *Parallelisierung* erreicht. In den Testreihen D und E wurden zunächst in einem Durchgang bzw. in den ersten fünf Durchgängen ausschließlich *parallelisierte* Verschaltungen ausgewählt. Die anschließenden Durchgänge führten in wenigen Fällen dennoch zu *Pinch*-Verletzungen, wie sie in Abschnitt 4.2.2 beschrieben werden. Die in diesem Abschnitt beschriebene Trennung

\bar{Y}_{Ziel}	$\bar{n}_{W\ddot{U}}$	i_P	$i_{max,3}$
80 %	2,98	0	3
87 %	3,89	0	4
91 %	4,74	0	5
95 %	6,17	0	7
98 %	7,89	2	10
99 %	8,86	2	14

Tabelle 4.3: Optimale Verschaltungsfolgen

der beiden Subsystem mit Hilfe der Gewichtungsfaktoren wurde in diesen Testreihen noch nicht eingesetzt. In Testreihe F führt der Einsatz dieser Trennung bei vollständiger *Parallelisierung* zu durchschnittlich 12,07 Verschaltungen und stets zum Gütegrad von 100 %.

Die Berechnungen der ersten 6 Testreihen beruhen alle auf dem Auswahlverfahren der *ungarischen* Methode. Die daraus resultierenden Ergebnisse hinterlassen den Eindruck, als führe die Methode der *Parallelisierung* bei nur mäßiger Verbesserung der Wärmenutzung zu unwirtschaftlich komplizierten Netzwerken. Tatsächlich können aber gerade einfache Netzwerke durch gezielten Einsatz der *Parallelisierung* gefunden werden, wenn anstelle des Auswahlverfahrens der *ungarischen* Methode das Auswahlverfahren der $k_{W\ddot{U}}$ größten Wärmeübertragers benutzt wird mit $k_{W\ddot{U}} = 1$. Tabelle 4.3 zeigt, wie vorgegebene Gütegrade mit jeweils einer minimalen Anzahl von Verschaltungen gefunden werden können.

Es mag überraschen, daß drei Durchgänge mit $k_{W\ddot{U}} = 1$ mit maximal übertragbarer Wärme und Verschaltung nach Typ 3, also $i_{max,3} = 3$, bereits zu einem durchschnittlichen Gütegrad von 80 % führen. Immerhin benötigt das einfache OMNIUM-Verfahren 3,6 Wärmeübertrager für einen Gütegrad von 75 %. Dies deutet auf das Potential der Restwärme hin, welches von OMNIUM nicht genutzt wird. Mit durchschnittlich 4,74 Wärmeübertragern werden durch die exergieoptimierte Verschaltung des Typs 3 bereits über 90 % der maximal möglichen Wärme übertragen und mit durchschnittlich 6,17 Wärmeübertragern bereits 95 %. Für dieses Ergebnis waren mit der *ungarischen* Methode und der einfachen Verschaltung nach Typ 1 noch durchschnittlich 9,25 Wärmeübertrager notwendig. Durch den Einsatz einiger weniger *parallelisierter* Wärmeübertrager, z.B. maximal zwei ($i_P = 2$) läßt sich ein Gütegrad von 98 % mit nur durchschnittlich 7,89 Wärmeübertragern und 99 % mit durchschnittlich 8,86 Wärmeübertragern erzielen.

Diese Darstellung zeigt, daß die exergieoptimierten Verschaltungen sehr wohl von prakti-

schem Nutzen sind und das Verfahren somit zur Erstellung einfacher Netzwerke geeignet ist. Im folgenden Abschnitt sollen anhand der Modellbeispiele die Ergebnisse der statistischen Auswertung untermauert werden.

4.3.2 Anwendung auf die Modellbeispiele

Bei der Anwendung des entwickelten Verfahrens wurde auf die Freiheitsgrade des Anwenders aufmerksam gemacht. Je nach Prozeß sind entweder die *ungarische* Methode oder das Auswahlverfahren der größten Wärmeübertrager günstiger. Auch die Wahl der Wärmeübertragerverschaltung sowie in Anzahl der *parallelisierten* Durchgänge sind frei wählbar. Die Vorgehensweise zur Bestimmung des optimalen Netzwerkes ist durch diese Flexibilität leicht durchzuführen. Anfangend vom OMNIUM-Verfahren ohne Restwärmennutzung bis hin zur mehrfachen *Parallelisierung* und Restwärmennutzung nach Verschaltungstyp 3 liefert das Verfahren eine Vielzahl von Lösungen, aus denen diejenige ausgewählt werden kann, die den Anforderungen entspricht. Bei Prozessen mit vielen Strömen ist das Auswahlverfahren der größten Wärmeübertrager ($k_{W\ddot{U}} = 1, 2, \dots$) zu empfehlen. Die Bestimmung des Optimums erfolgt iterativ vom Anwender. An den bekannten Modellbeispielen wird ein Vergleich zwischen den bestehenden Verfahren und entwickelten Verfahren aufgezeigt.

Modellbeispiel A

Das 4-Strom Problem des Modellbeispiels A führt bei Nutzung der Restwärme nach Verschaltungstyp 1 bereits zu einem Netzwerk mit 4 Wärmeübertragern und einem Gütegrad von 90,88 %, vgl. Abbildung 4.6 oben. Die Wärmeübertragung im Wärmeübertrager 4 wird dadurch begrenzt, daß die Eintrittstemperatur des kalten Stromes $C3$ bereits $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ beträgt und somit den heißen Strom $H4$ bei einer geforderten minimalen Temperaturdifferenz von $\Delta T_{min} = 10\text{ K}$ nur auf $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ abkühlen kann. Unter Verwendung des exergieoptimierten Verschaltungstyps 3 wird Strom $C1$ derart geteilt, daß Strom $H4$ parallel dazu den kalten Strom im Zeitintervall $0,3 \leq \tau \leq 0,5\text{ h}$ vollständig aufheizen kann. Entsprechendes gilt für Wärmeübertrager 3, der nun statt $83,2\text{ kWh}$ 88 kWh übertragen kann. Insgesamt führt die Verschaltung nach Typ 3 zum MHX-Ergebnis. An diesem Beispiel wird deutlich, daß die Anzahl der Wärmeübertrager im Vergleich zum Netzwerk bei Nutzung der Restwärme nach Verschaltungstyp 1 sich nicht verändert. Lediglich die Stromteilung erhöht die Komplexität des Netzwerkes.

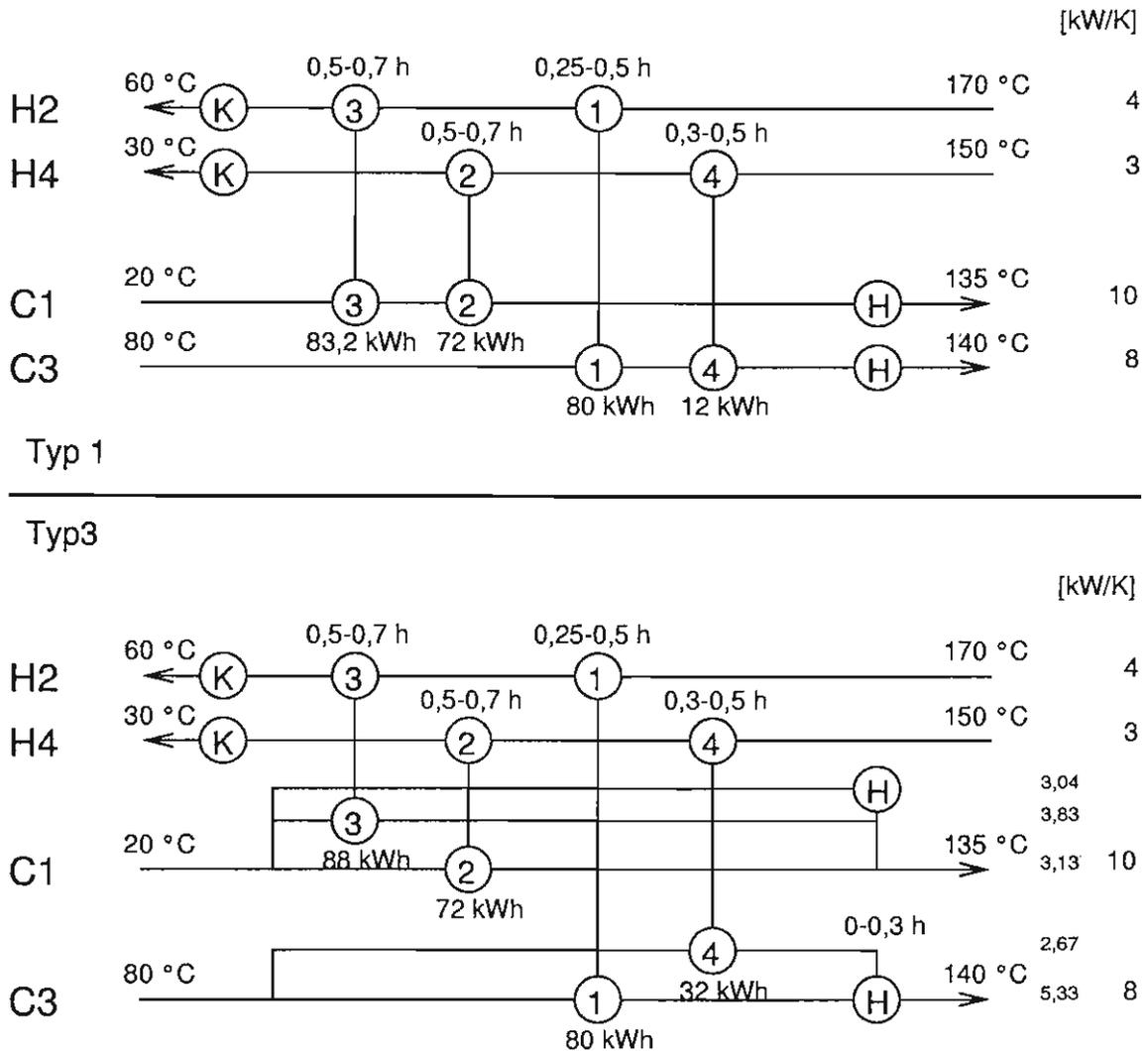


Abbildung 4.6: Prozeß A: OMNIUM-Netzwerke mit Restwärme nach Typ 1 und Typ 3

Modellbeispiel B

Für das Modellbeispiel B kann ohne vorherige *Parallelisierung* maximal ein Netzwerk generiert werden, welches einen Gütegrad von 95,47 % besitzt und dem relaxierten Netzwerk aus Abbildung 4.1 entspricht. Ein Durchgang mit *Parallelisierung* und zwei weitere Durchgänge mit Nutzung der maximalen Restwärme führen zum MHX-Netzwerk, welches in Abbildung 4.7 dargestellt ist. Durch die *Parallelisierung* wird verhindert, daß die Abwärmequelle AQ2 ihr gesamtes Potential von 4800 kWh dem Wärmeverbraucher WV4 bei einer durchschnitt-

lichen Temperaturdifferenz von $50K$ zur Verfügung stellt, vgl. Abbildung 4.1 unten. Statt dessen werden zunächst die Verschaltungen 1, 2 und 3 aus Abbildung 4.7 festgelegt mit minimalen konstanten Temperaturdifferenzen von $10 K$. Die größte Bedeutung hat in diesem Durchgang die Wahl von Wärmeübertrager 2, der die Stromspaltung von Wärmeverbraucher $WV4$ erfordert und somit zu große Exergieverluste verhindert. Im Vergleich zum MHX-Netzwerk aus Abbildung 4.1 findet das neue Verfahren zunächst sehr große Wärmeübertrager, die bis zu $4560 kWh$ ($WÜ 1$) übertragen, aber in späteren Durchgängen sehr kleine Wärmeübertrager, die nur $30 kWh$ ($WÜ 7$) übertragen. Auf Grund dieser Tatsache läßt sich dieses Netzwerk unter Wegfall der kleinen Wärmeübertrager leichter wirtschaftlich optimieren als das *Pinch*-Netzwerk. So führt beispielsweise die Nutzung der ersten 5 Wärmeübertrager zu einem Gütegrad von $98,45\%$ mit und $96,9\%$ ohne Stromspaltung. Die Wärmeübertragerkenndaten, die zur Generierung des Netzwerkes dienen, sind in Tabelle 4.4 angeführt.

WÜ	Stoff	Temperaturintervall	$\dot{m}c_p$ [kW/K]	Zeitintervall	\dot{Q} [kW]	Q [kWh]
1	AQ2	550 \rightarrow 360	2,0	9-21 h	380	4560
	WV1	540 \leftarrow 350	2,0			
2	AQ3	500 \rightarrow 310	1,5	9-18 h	285	2565
	WV4	490 \leftarrow 300	1,5			
3	AQ1	500 \rightarrow 310	1,0	3-15 h	190	2280
	WV2	490 \leftarrow 300	1,0			
4	AQ2	550 \rightarrow 350	2,0	6-9 h	400	1200
	WV4	500 \leftarrow 300	2,0			
	AQ2	360 \rightarrow 350	2,0	9-18 h	20	180
	WV4	340 \leftarrow 300	0,5			
5	AQ3	500 \rightarrow 360	1,5	18-21 h	210	630
	WV3	455 \leftarrow 350	2,0			
6	AQ3	360 \rightarrow 327	1,5	18-21 h	50	150
	WV2	350 \leftarrow 300	1,0			
7	AQ2	550 \rightarrow 545	2,0	3-6 h	10	30
	WV2	500 \leftarrow 490	1,0			

Tabelle 4.4: Prozeß B: Kenndaten der Wärmeübertrager

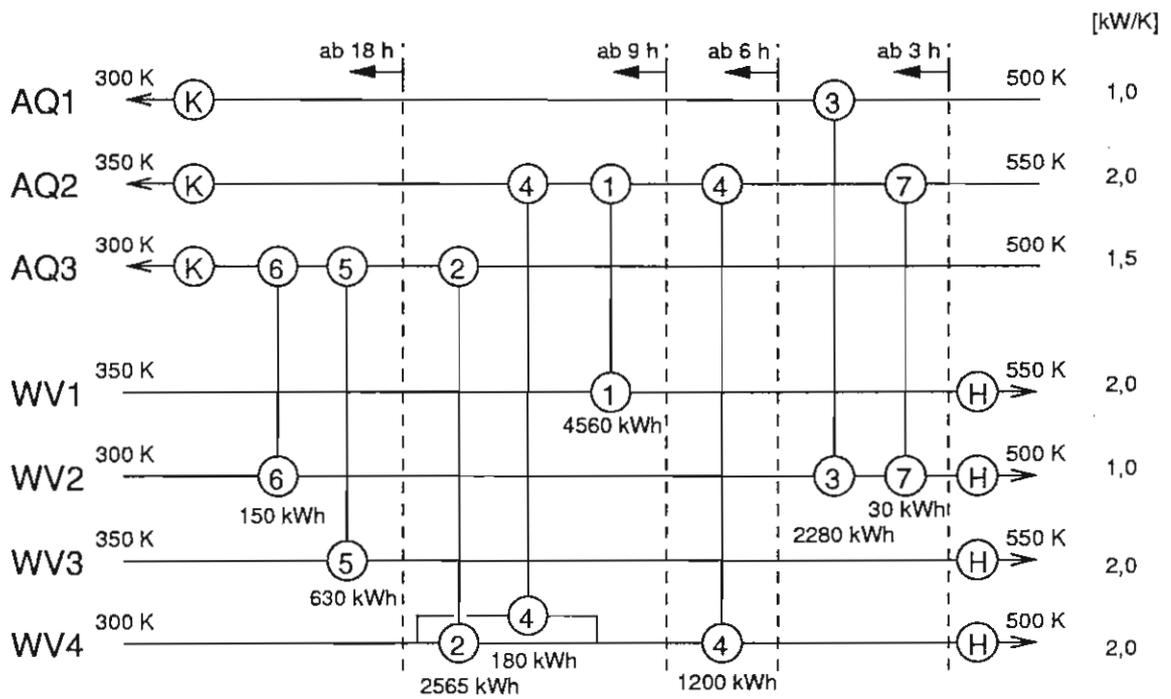


Abbildung 4.7: Prozeß B: MHX-Netzwerk nach *Parallelisierung*

Kapitel 5

Einsatz von Speichern und Wärmepumpen

Im vorherigen Kapitel wurden Methoden entwickelt, die bei direkter Wärmeübertragung zu den Energiezielen führen, die durch den 1. und 2. Hauptsatz der Thermodynamik vorgegeben sind. Der Einsatz von Speichern und Wärmepumpen erweitert die Möglichkeiten der Wärmeintegration grundsätzlich erheblich. Um ihr Potential im Rahmen der Wärmeintegration optimal auszunutzen, ist eine flexible Einbindung dieser Instrumente in das bestehende Verfahren erforderlich.

5.1 Speicher

Bei *Batch*-Prozessen wird den Wärmespeichern eine besonders wichtige Rolle zuteil. Durch ihren Einsatz kann die zeitliche Disparität von Verfügbarkeit und Bedarf der Wärme weitestgehend eliminiert werden. Durch die Verwendung von Verdrängungsspeichern mit idealer Temperaturschichtung läßt sich die Wärme eines heißen Stromes während des Aufladevorgangs durch einen Aufladestrom des Speichers mit Gegenstromführung aufnehmen und bei hoher Temperatur speichern. Diese Wärme wird durch einen Entladestrom an einen kalten Strom zu einem anderen Zeitraum wieder abgegeben, vgl. Abbildung 5.1.

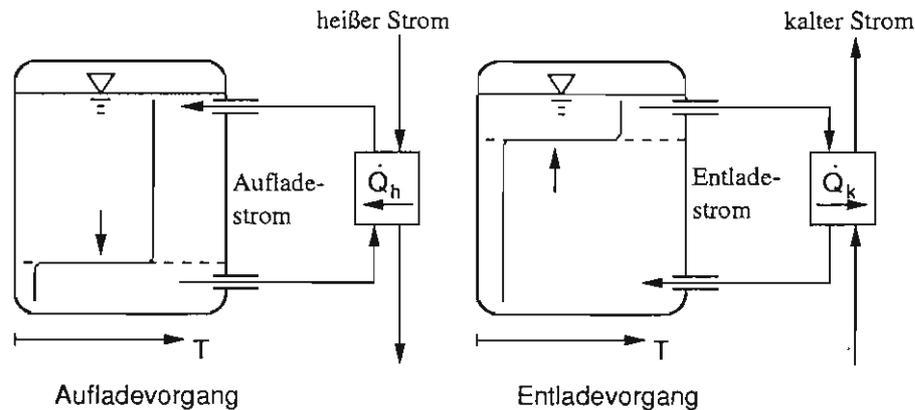


Abbildung 5.1: Auf- und Entladevorgang eines ideal geschichteten Verdrängungsspeichers

Für den ideal geschichteten, adiabaten Speicher ist die aufgenommene Wärme Q_h gleich der abgegebenen Wärme Q_k . Die mit dem Auf- und Entladevorgang einhergehenden Wärmeströme ergeben sich durch die Zeitspannen $\Delta\tau_{\text{Aufladen}}$ bzw. $\Delta\tau_{\text{Entladen}}$ zu

$$\dot{Q}_h = \frac{Q_h}{\Delta\tau_{\text{Aufladen}}} \text{ und} \quad (5.1)$$

$$\dot{Q}_k = \frac{Q_k}{\Delta\tau_{\text{Entladen}}}, \quad (5.2)$$

und sind in der Regel nicht identisch. Entsprechend passen sich die Massenströme für den Auf- und Entladevorgang an. Aus der Forderung, bei der Wärmeübertragung die minimale Temperaturdifferenz in den Wärmeübertragern $\Delta T_{W\ddot{U},min}$ nicht zu unterschreiten, ergibt sich bei Einsatz eines Speichers eine minimale Temperaturdifferenz zwischen Abwärmquelle und Wärmeverbraucher von $\Delta T_{Sp,min} = 2 \cdot \Delta T_{W\ddot{U},min}$. Die durch Speicherung maximal übertragbare Wärmemenge von einem heißen Strom auf einen kalten Strom läßt sich analog zu Kapitel 4 mit Hilfe des 1. und des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik berechnen. Bei Einsatz eines Speichers hat die gemeinsame Verfügbarkeit von Abwärmquelle und Wärmeverbraucher allerdings keine Bedeutung mehr. Daher ergibt sich das speicherbare Abwärmepotential des heißen Stromes zu

$$Q_{h,max} = \dot{Q}_{h,max} \cdot \Delta\tau_h, \quad (5.3)$$

mit $\Delta\tau_h$ als dem Zeitintervall, in dem der heiße Strom fließt. Entsprechend ist der maximale

Wärmebedarf des kalten Stromes

$$Q_{k,max} = \dot{Q}_{k,max} \cdot \Delta\tau_k, \tag{5.4}$$

mit $\Delta\tau_k$ als dem Zeitintervall, in dem der kalte Strom fließt. Die maximal speicherbare Wärmemenge ist somit der kleinere Wert von Abwärmepotential und Wärmebedarf und läßt sich schreiben als

$$Q_{Sp,max} = MIN \{Q_{h,max}; Q_{k,max}\}. \tag{5.5}$$

Die maximalen Wärmeströme $\dot{Q}_{h,max}$ und $\dot{Q}_{k,max}$ werden nach Gleichung 4.6 und 4.7 bestimmt. In diesen Gleichungen müssen sowohl $(T_k)_{aus,W\ddot{U},max}$ und $(T_h)_{aus,W\ddot{U},min}$ mit der minimalen Temperaturdifferenz zwischen kaltem und heißem Strom von $\Delta T_{Sp,min}$ anstelle von ΔT_{min} in den Gleichungen 4.4 und 4.5 berechnet werden. Dieser Rechengang verdeutlicht die Analogie zwischen Speichern und Wärmeübertragern. Während bei Wärmeübertragern der vom heißen Strom abgegebene Wärmestrom gleich dem aufgenommenen Wärmestrom des kalten Stromes ist, fordert die Speicherung identische Wärmemengen von heißem und kaltem Strom. Eine Einschränkung der Wärmespeicherung ist daher nicht auf der T, \dot{H} -Ebene sondern vielmehr auf der T, H -Ebene sichtbar. Die Multiplikation der Wärmekapazitätsströme mit den jeweiligen Zeitintervallen liefert die erforderliche Transformation, wie es Abbildung 5.2 verdeutlicht.

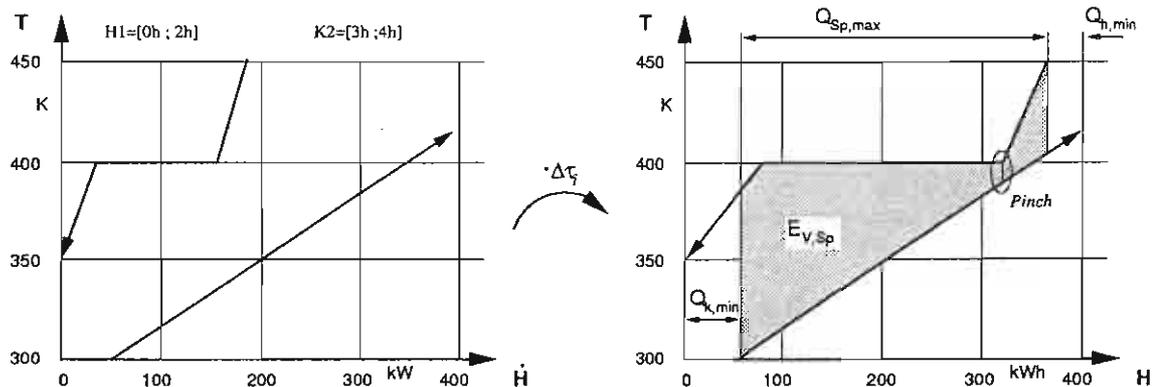


Abbildung 5.2: Pinch-Problematik bei Speichern

In dieser Abbildung ist ein heißer Strom $H1$ abgebildet, der im Zeitintervall $0-2 h$ abgekühlt werden soll und dabei einen Phasenwechsel von dampfförmig zu flüssig durchläuft. Der kalte Strom ändert hingegen seine spezifische Wärmekapazität im gesamten Temperaturintervall nicht und fließt im Zeitintervall von $3-4 h$. Die maximal speicherbare Wärme

$Q_{Sp,max}$ läßt sich erst im T, H -Diagramm (rechts) erkennen. Sie wird durch den *Pinch* zu Beginn des Phasenwechsels von dampfförmig zu flüssig begrenzt. An dieser Stelle liegt die Temperatur des heißen Stromes um $\Delta T_{Sp,min}$ höher als die des kalten Stromes. Somit wird die thermodynamische Bedingung für eine Wärmeübertragung in den Speicher hinein und aus dem Speicher heraus gewährleistet. Die Größe des Exergieverlustes $E_{V,Sp}$, der durch diesen Wärmetransfer entsteht, ist gegeben durch die mittlere Temperaturdifferenz zwischen Abwärmequelle und Wärmeverbraucher und somit unabhängig von der Verschaltung beim Auf- und Entladen des Speichers. Bezüglich der Dimensionierung von Speichern sowie deren Verschaltungsmöglichkeiten wird ein weiteres Beispiel zweier Ströme betrachtet, bei dem der heiße Strom keinen Phasenwechsel durchläuft. Abbildung 5.3 zeigt den heißen Strom $H1$, der von $450K$ auf $350K$ im Zeitintervall von $0-2 h$ mit einem Wärmekapazitätsstrom von $(\dot{m}c_p)_{H1} = 2,0kW/K$ abzukühlen ist, und den kalten Strom $K2$, der von $300K$ auf $415K$ im Zeitintervall $3-4 h$ mit einem Wärmekapazitätsstrom von $(\dot{m}c_p)_{K2} = 3,0kW/K$ aufzuheizen ist.

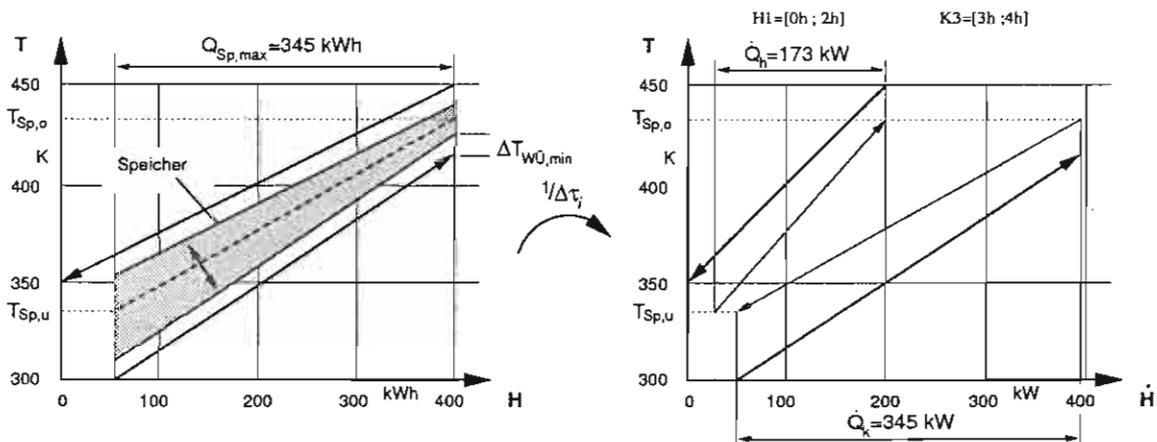


Abbildung 5.3: Realisierung von Speichern im T, H -Diagramm

In diesem Beispiel wird die Wärmespeicherung nicht durch einen *Pinch* begrenzt. Dadurch ergibt sich ein Freiheitsgrad in der Dimensionierung der Speicher. Wie aus dieser Zeichnung ersichtlich, kann eine Wärmemenge von $Q_{Sp,max} = 345 \text{ kWh}$ gespeichert werden. Diese Wärme muß so vom Aufladestrom aufgenommen werden, daß an keiner Stelle der Wärmeübertragung eine Temperaturdifferenz von $\Delta T_{WU,min}$ unterschritten wird. Gleiches gilt für den Entladestrom bei der Wärmeabgabe. Trotz unterschiedlicher Wärmeströme fallen Auflade- und Entladestrom des Speichers im T, H -Diagramm zusammen, da der Aufladestrom dieselbe Wärmemenge aufnimmt, die der Entladestrom abgibt und den Temperaturen beider Ströme bei Vernachlässigung von Wärmeverlusten identisch sind. Aus diesen Bedingungen folgt, daß diese Ströme eine Gerade im schraffierten Bereich darstel-

len. Die Lage bzw. Steigung dieser Gerade ist dabei nicht festgelegt, sondern durch die obere und untere Temperatur des Speichers $T_{Sp,o}$ bzw. $T_{Sp,u}$ innerhalb der entsprechenden Grenzen frei wählbar. Zusammen mit der zu speichernden Wärmemenge ergibt sich die Wärmekapazität des Speichers zu

$$(mc_p)_{Sp} = \frac{Q_{Sp,max}}{T_{Sp,o} - T_{Sp,u}}, \quad (5.6)$$

und die Wärmekapazitäten der Auflade- bzw. Entladeströme zu

$$(\dot{m}c_p)_{Sp,auf} = \frac{(mc_p)_{Sp}}{\Delta\tau_{Aufladen}}, \quad (5.7)$$

$$(\dot{m}c_p)_{Sp,ent} = \frac{(mc_p)_{Sp}}{\Delta\tau_{Entladen}}. \quad (5.8)$$

Nach dem das Vorgehen zur Berechnung der maximal speicherbaren Wärmemenge und deren Realisierung durch ideal geschichtete Verdrängungsspeicher erläutert wurde, läßt sich ein Weg zur Bestimmung der optimalen Verschaltung von Abwärmequellen und Wärmeverbrauchern über Speicher analog zur direkten Verschaltung mit Wärmeübertragern beschreiben. Anstelle von direkt übertragbaren Wärmemengen wird bei der Verschaltung mit Speichern eine Wärmematrix mit Elementen von speicherbaren Wärmemengen aufgestellt. Aus dieser Matrix werden Verschaltungen bestimmt, welche zu entsprechenden Restströmen führen. Aus diesen wird dann erneut eine Matrix aufgestellt und der Vorgang soweit wiederholt, bis keine Wärme mehr durch Speicher übertragbar ist. Die in Kapitel 4 im T, \dot{H} -Diagramm hergeleiteten Optimierungsmethoden hinsichtlich der Exergieverlustminimierung lassen sich bei Speichern im T, H -Diagramm übernehmen. Das bedeutet, es muß unterschieden werden in

- maximal speicherbare Wärme und
- speicherbare Wärme im gleichen Temperaturbereich (*Parallelisierung*).

Während die maximal speicherbare Wärme zu wenigen großen Speichern mit entsprechenden Wärmeübertragern führt, bewirkt die *Parallelisierung* hohe Gütegrade der Netzwerke bei erhöhtem technischen Aufwand. Für die Verschaltung der maximal speicherbaren Wärme ergeben sich ebenfalls die drei gleichen Möglichkeiten, die zuvor für Wärmeübertrager vorgestellt wurden, vgl. Abbildung 4.2. Es sind

Typ 1 maximaler Exergieverlust durch Verwendung von Wärmeübertragern mit minimaler Oberfläche,

Typ 2 minimaler Exergieverlust ohne Wärmekapazitätsteilung und

Typ 3 minimaler Exergieverlust mit Wärmekapazitätsteilung.

Die Berechnung der maximal speicherbaren Wärme folgt aus den Gleichungen 5.3 bis 5.5. Für *parallelisierbare* Strompaarung wird die Wärmemenge gemäß Gleichung 4.13 zu

$$Q_{Sp,P} = MIN \{ (\dot{m}c_p\Delta\tau)_h; (\dot{m}c_p\Delta\tau)_k \} \cdot [T_o - T_u]. \quad (5.9)$$

Die Übertragung der Verschaltungstypen auf Speicher ist einfach. Der *Pinch* wird analytisch auf der T, H -Ebene ermittelt. Wärmekapazitätsströme werden somit zu Wärmekapazitäten $(\dot{m}c_p\Delta\tau)_i$. Analog zur Stromteilung werden für eine Verschaltung mit maximaler Wärme nach Typ 3 sowie mit *Parallelisierung* die Wärmekapazitäten aufeinander abgestimmt. Diese Anpassung geschieht hier nicht durch die Teilung der Massenströme, wie es in Kapitel 4 durchgeführt wurde, sondern durch Aufteilung des Zeitintervalls. Das heißt für Abwärmequellen mit größerer Wärmekapazität, daß der Speicher bis zum Erreichen seiner Kapazität aufgeladen wird. Danach steht der heiße Strom dem System weiter als Abwärmequelle zur Verfügung. Entsprechend verhält es sich bei Wärmeverbrauchern mit größerer Wärmekapazität. Ist der Speicher vollständig entladen, so muß der Strom in der verbleibenden Zeit durch andere Wärmequellen aufgeheizt werden. Er steht somit als Reststrom im folgenden Durchgang wieder zur Verfügung und wird gegebenenfalls erneut Verschaltet. Das Konzept der Exergieoptimierung ist also für direkte Wärmeübertragung und für den Einsatz von Speichern das gleiche und führt bei statistischen Untersuchungen zu vergleichbaren Ergebnissen. Das bedeutet, daß die ausschließliche Verwendung von maximal speicherbarer Wärme die Bestimmung eines MER-Netzwerkes nicht gewährleisten kann. Erst die vollständige *Parallelisierung* mit der vereinfachten Trennung der Subsysteme durch Gewichtungsfaktoren führt sicher zum MER-Netzwerk (vgl. Abschnitt 4.2.2).

Aufgrund des gleichen Aufbaus der Verfahren für direkte Wärmeübertragung und Speicher, erfolgt die Einbindung der Speicher in das Wärmeintegrationsprogramm ebenfalls analog. Der Anwender gibt die Anzahl der Durchgänge mit *Parallelisierung*, $i_{Sp,P}$ und die Anzahl der Durchgänge mit maximal speicherbarer Wärme, $i_{Sp,max}$ sowie deren Verschaltungstypen (1, 2 oder 3) an. Diese Durchgänge werden vom Programm nach Beendigung der $i_{WÜ,P} + i_{WÜ,max}$ Durchgänge für die direkte Wärmeübertragung abgearbeitet. Die Behandlung der Modellbeispiele A und B soll die Möglichkeiten dieses Verfahrens illustrieren.

Modellbeispiel A

Die bisherigen Untersuchungen zeigten, daß in diesem Beispiel der Einsatz von vier Wärmeübertragern zu einer Primärenergieeinsparung von 272 kWh mit einem Gütegrad von $Y = 1$ führen kann. Das Netzwerk konnte ohne den Einsatz von *parallelisierten* Verschaltungen mit der exergetisch optimierten Verschaltung des Typs 3 für maximal übertragbare Wärme realisiert werden. Ähnlich verhält es sich bei den Speichern. Bei einer erhöhten Mindesttemperaturdifferenz von $\Delta T_{Sp,min} = 20 \text{ K}$ liegt die maximale Wärmemenge, die mit Speichern zurückgewonnen werden kann, bei 405 kWh , sofern zusätzlich keine direkte Wärmeübertragung stattfindet. Durch die einfache Verschaltung nach Typ 1 kann mit zwei Speichern und daraus resultierend vier Wärmeübertragern eine Wärmemenge von 375 kWh übertragen werden. Die exergetisch optimierte Verschaltung nach Typ 3 verschaltet diese beiden Speicher so, daß noch ein dritter Speicher eingesetzt werden kann. Dies führt zu einem Ergebnis von 405 kWh . Die Verschaltung wird sowohl aus Tabelle 5.1 und Abbildung 5.4 ersichtlich. Sie ist bezogen auf die Energieeinsparung sehr einfach, verlangt aber insgesamt drei zusätzliche Wärmeträgerkreisläufe. Die Voraussetzung, daß die Prozesse zyklisch sind, was bei *Batch*-Prozessen in der Regel gegeben ist, ermöglicht eine Entladung des Speichers bereits bevor der heiße Strom desselben Zyklus diesen Speicher aufladet. So ist es möglich, daß der Speicher 1 im Zeitraum $\tau = 0,00 \text{ h} \dots 0,44 \text{ h}$ vom kalten Strom *C3* entladen wird, obwohl der heiße Strom *H2* erst im Zeitraum $\tau = 0,25 \text{ h} \dots 1,00 \text{ h}$ fließt.

Sp	Stoff	Temperaturintervall	$\dot{m}c_p$ [kW/K]	Zeitintervall	\dot{Q} [kW]	Q [kWh]
1	H2	170 \longrightarrow 100	4,0	0,25-1,00 h	280	210
	C3	140 \longleftarrow 80	8,0	0,00-0,44 h	480	
2	H4	150 \longrightarrow 40	3,0	0,30-0,80 h	330	165
	C1	130 \longleftarrow 20	10,0	0,50-0,65 h	1100	
3	H2	100 \longrightarrow 60	4,0	0,25-0,44 h	160	30
	C1	80 \longleftarrow 20	10,0	0,65-0,70 h	600	

Tabelle 5.1: Prozeß A: Kenndaten der Speicher

Alternativ zu diesem einfachen Netzwerk läßt das Wärmeintegrationsverfahren ebenfalls direkte Wärmeübertragung und Speicher zugleich zu. In den ersten zwei Durchgängen kann somit das MHX-Netzwerk zunächst für direkte Wärmeübertragung und anschließend aus den daraus resultierenden Restströmen eine optimale Speicherverschaltung ermittelt werden. Bei der Vorgabe einer minimalen Temperaturdifferenz $\Delta T_{WÜ,min} = 10 \text{ K}$ für alle Wärmeübertrager, also $\Delta T_{Sp,min} = 20 \text{ K}$ läßt sich mit einem hochgradig komplexen Netzwerk eine Wärme von $425,71 \text{ kWh}$ zurückgewinnen. Das heißt, daß der Exergieverlust bei

werden soll. Das Verfahren bietet dem Anwender die Option, Speicher nur in bestehende Verschaltungen einzubauen, was die Komplexität des neuen Systems in Grenzen hält. Das heißt, dort wo Wärme bislang direkt zwischen zwei Stoffen übertragen wurde, wird nun die Wärme über einen Sekundärkreislauf mit Speicher übertragen. Für das betrachtete Beispiel werden zwei Speicher ermittelt, mit denen das MER-Ziel erreicht wird. Zwischen AQ2 und WV4 ($WÜ4$) sowie zwischen AQ2 und WV2 ($WÜ7$) kann mit diesen Mitteln insgesamt eine zusätzliche Wärmemenge von 1230 kWh prozeßintern übertragen werden. Dementsprechend sinkt der Primärenergieeinsatz zum Heizen sowie der Aufwand für die Kühlung. Die in Tabelle 4.4 aufgelisteten Daten zeigen, daß bei diesen Verschaltungen die Wärmeübertragung über einen Zwischenkreislauf mit entsprechend höherer Energieentwertung möglich ist, da die minimale Temperaturdifferenz der Verschaltungen größer gleich der doppelten zulässigen von $2 \cdot \Delta T_{WÜ,min}$ ist. Abbildung 5.5 gibt eine Übersicht der Verschaltungen.

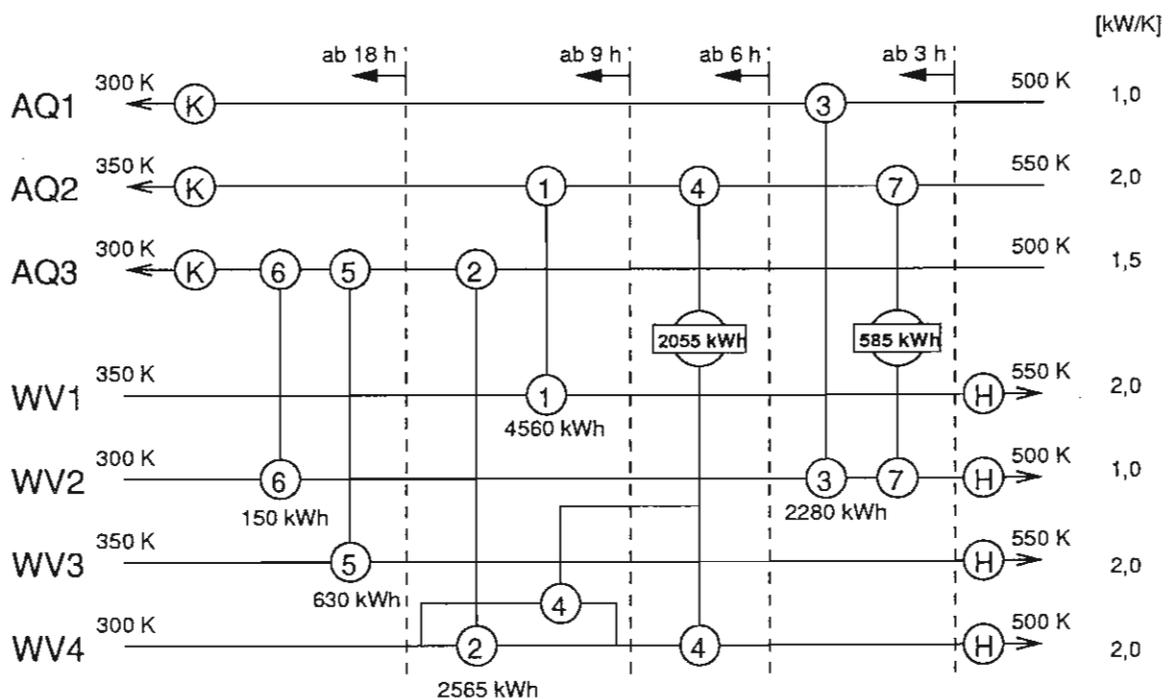


Abbildung 5.5: Prozeß B: MER-Netzwerk

5.2 Wärmepumpen

Neben dem Speichern von Wärme sind Wärmepumpen ein weiteres Instrument, das sich dazu eignet, Abwärme von einem niedrigen Temperaturniveau auf ein höheres anzuheben

mit P als der mechanisch zugeführten Verdichterleistung. Die unvermeidlichen Wärmeabstrahlungsverluste des Verdichters sind abhängig von Bauart, Betriebs- und Umgebungsbedingungen. Sie werden jedoch umso größer, je größer P gegenüber \dot{Q}_O wird. Richtwerte für überschlägige Berechnungen der realen Wärmeabgabe ergeben sich deshalb durch einen Korrekturfaktor a :

$$\dot{Q}_C = \dot{Q}_O + a \cdot P. \quad (5.13)$$

Der Korrekturfaktor a ist über weite Bereiche verschiedener Betriebszustände nahezu konstant und nimmt Werte von $a = 0,8 \dots 0,9$ an, siehe [14]. Einsparung von Primärenergie sowie von Betriebsmitteln sind dann möglich, wenn der eingesetzte Strom zu einer erheblich größeren Wärmeausnutzung führt. Kenngrößen für die Bewertung einer Wärmepumpe bzw. einer Kältemaschine sind die Leistungszahlen ϵ_W bzw. ϵ_K . Sie sind definiert als

$$\epsilon_W = \frac{\text{Verflüssiger - Wärmeabgabe}}{\text{Antriebsleistung}} = \frac{\dot{Q}_C}{P}, \quad (5.14)$$

$$\epsilon_K = \frac{\text{Kälteleistung}}{\text{Antriebsleistung}} = \frac{\dot{Q}_O}{P}. \quad (5.15)$$

Die im nie erreichbaren Idealfall des *Carnot*-Prozesses maximal möglichen Leistungszahlen ergeben sich allein aus den absoluten Temperaturen wie folgt:

$$\epsilon_{WC} = \frac{T_C}{T_C - T_O}, \quad (5.16)$$

$$\epsilon_{KC} = \frac{T_O}{T_C - T_O}. \quad (5.17)$$

Das Verhältnis zwischen realer und idealer Leistungszahl nennt man den *Carnotschen* Gütegrad:

$$\eta_{CW} = \frac{\epsilon_W}{\epsilon_{WC}}, \quad (5.18)$$

$$\eta_{CK} = \frac{\epsilon_K}{\epsilon_{KC}}. \quad (5.19)$$

Die Werte für diesen Gütegrad liegen bei ausgeführten Maschinen um $\eta_{CW} = 0,5 \dots 0,6$. Mit diesem Formelwerk läßt sich mit vorgegebenen Werten von a und η_{CW} der Einsatz von Wärmepumpen in das bestehende Wärmeintegrationsverfahren integrieren. Wärmepumpen werden erst dann eingesetzt, wenn sich keine weitere Wärme direkt übertragen läßt. Es werden also diejenigen Stoffpaarungen betrachtet, bei denen das Temperaturniveau der

Abwärmequelle geringer ist als das Temperaturniveau des Wärmeverbrauchers. In Gleichung 5.16 wird deutlich, daß der Einsatz einer Wärmepumpe umso wirtschaftlicher ist, je geringer die Temperaturdifferenz $T_C - T_O$ ist. Mit der Vorgabe des *Carnotschen* Gütegrades läßt sich von jeder Stoffpaarung die Leistungszahl berechnen. Diese Größe macht eine Aussage über die Wirtschaftlichkeit von Wärmepumpen zur Substitution von Heizöl durch elektrischen Strom. Für einen Wert von $\epsilon_W = 4$ bezogen auf die elektrische Leistung und einem Strompreis von 15 DM/MWh ergeben sich bei einem Heizölpreis von über 3,75 DM/MWh Rückläufe aus der Differenz zwischen Heizölpreis und Quotient aus Strompreis und Leistungszahl zur Deckung der Investition. In dem ausgeführten Rechenprogramm gibt der Anwender eine geforderte Mindestleistungszahl $(\epsilon_W)_{min}$ vor. Der Algorithmus berechnet daraufhin die übertragbaren Heizmengen derjenigen Stoffpaarungen, die zu einer größeren Leistungsziffer als der vorgegebene Mindestwert führen. In Durchgängen zur Verschaltung von Wärmepumpen berechnen sich die Elemente der Wärmematrix dann zu

$$(Q_{WP})_{i,j} = \begin{cases} 0 & : (\epsilon_W)_{i,j} < (\epsilon_W)_{min} \\ (Q_C)_{i,j} \cdot [(\epsilon_W)_{i,j} - (\epsilon_W)_{min}] & : (\epsilon_W)_{i,j} \geq (\epsilon_W)_{min} \end{cases} \quad (5.20)$$

Mit dem Faktor $[(\epsilon_W)_{i,j} - (\epsilon_W)_{min}]$ wird sichergestellt, daß die wirtschaftlichsten Verschaltungen für Wärmepumpen als erstes ausgewählt werden. Zur Bestimmung der Restwärmeströme müssen auch hier die Wärmepumpenkenndaten wie aufgenommene Wärmemenge Q_O , abgegebene Wärmemenge Q_C , elektrische Leistung P_{el} und das Einsatzzeitintervall sowie Verflüssiger- und Verdampfertemperatur T_C und T_O festgehalten werden. Auf eine exergetische Optimierung der Verschaltung, die ähnlich denkbar wäre wie bei den Wärmeübertragern, wurde an dieser Stelle bewußt verzichtet. Es zeigt sich, daß eine Stromspaltung oder Begrenzung des Temperaturintervalls für den Anwendungsbereich der Wärmepumpen nicht notwendig ist. Dieser beschränkt sich auf Abwärmequellen bzw. Wärmeverbrauchern mit einem schmalen Temperaturbereich für die Wärmeabgabe bzw. Wärmeaufnahme, wie z.B. eine exotherme Reaktion oder eine Verdampfung. Das Speichern der Wärme aus Wärmepumpen ist für Speicher mit geringer Temperaturspreizung denkbar. Diese Speicher werden durch je einen unendlich großen kalten und heißen Strom im gesamten Zeitbereich auf einem gewissen Temperaturniveau repräsentiert, z.B. $\Delta T_{Spk} = \Delta T_{Spk} = 1 \text{ K}$ und $(\dot{m}c_p)_{Spk} = (\dot{m}c_p)_{Spk} = 100000 \frac{kW}{K}$. Eine Wärmepumpe kann nun die Abwärme eines heißen Stromes jederzeit auf die Temperatur des Speichers (in den kalten Strom Spk) pumpen. Zu einer anderen Zeit kann der heiße Strom des Speichers entsprechend andere kalte Ströme aufheizen. Durch iteratives Variieren der Speichertemperatur kann der optimale Einsatzbereich des Speichers ermittelt werden.

Kapitel 6

Wärmeintegration eines milchwirtschaftlichen Prozesses

Das entwickelte Verfahren zur Wärmeintegration bei *Batch*-Prozessen wird im folgenden an einem milchwirtschaftlichen Prozeß exemplarisch vorgeführt. Dabei wird neben der direkten Wärmeübertragung die Einsatzfähigkeit von Speichern und Wärmepumpen mit berücksichtigt.

6.1 Beschreibung des Prozesses

In einem milchwirtschaftlichen Betrieb werden 105000l Rohmilch täglich angeliefert und zu Trinkmilch, Butter, Buttermilch, Speiseeis und Milchpulver verarbeitet (s. Abbildung 6.1). Zur Unterdrückung von Keimbildung wird die angelieferte Milch bei 5 °C in den Rohmilchtanks (RMT) gelagert. Von dort aus gelangt die Rohmilch in die Separatoren (S) und wird bei einer Temperatur von 55 °C in Magermilch und Rahm zu einem Massenverhältnis von 10:1 getrennt. Daraus resultiert bei einem Rohmilch-Fettgehalt von 3,9 % ein Magermilch-Fettgehalt von 1,3 % und ein Rahm mit 30 % Fettanteil. Sowohl Rahm als auch Magermilch werden in den Pasteurisatoren (P) pasteurisiert, d.h. wenige Sekunden bei Temperaturen von 72 °C für Magermilch und 105 °C für Rahm gehalten. Nach diesem Vorgang werden Magermilch und Rahm separat in entsprechenden Tanks (RT und MT) bei 5 °C gekühlt.

Im Butterungsprozeß wird Butter aus Rahm mit Buttermilch als Nebenprodukt gewonnen. Dazu findet zunächst eine Rahmreifung in den Rahmreifern (RR) statt, bei der das physikalische und biochemische Verhalten der Butter beeinflusst wird. Diese erfolgt durch drei

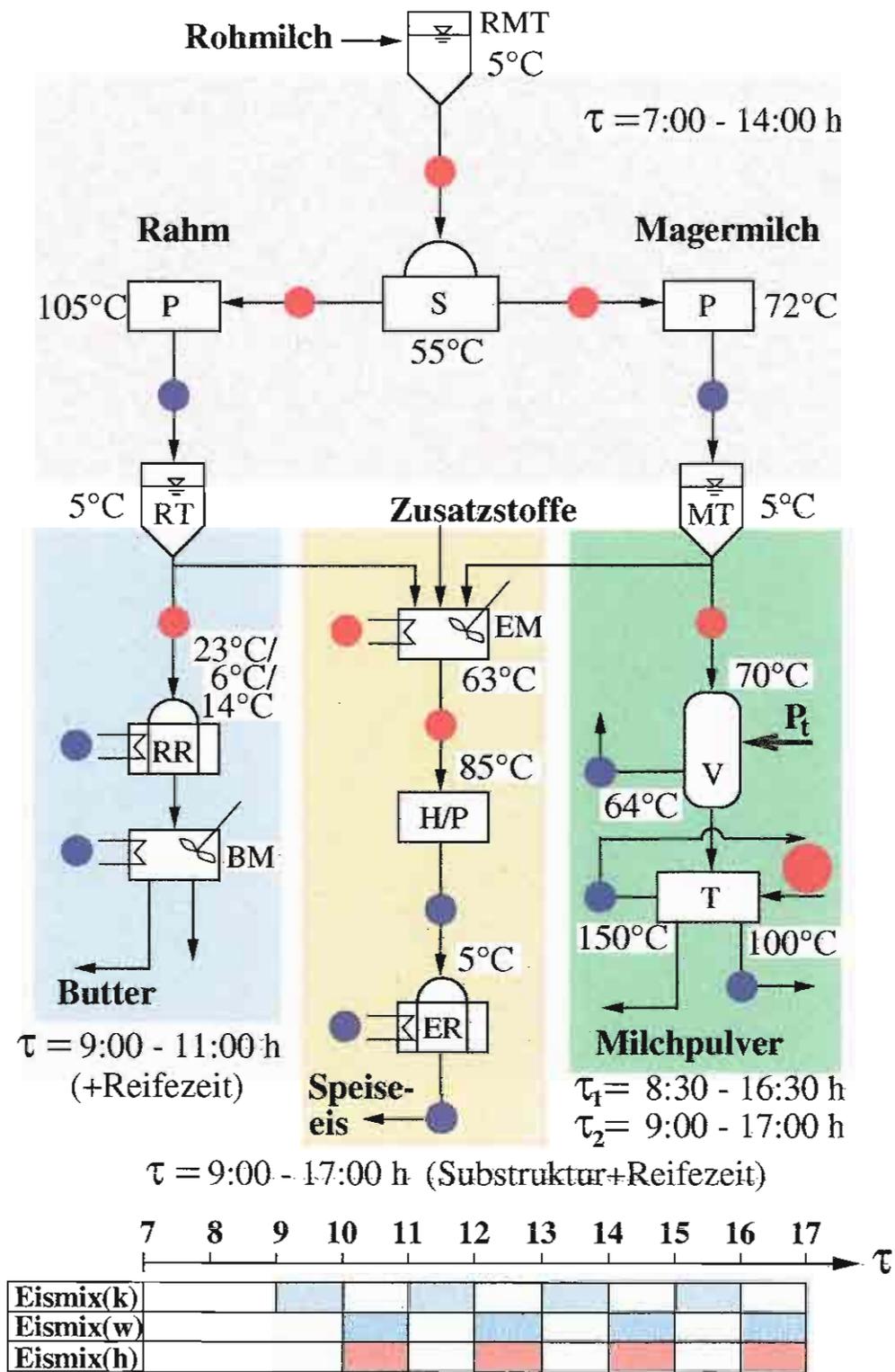


Abbildung 6.1: Milchwirtschaftlicher Prozeß (nicht integriert)

aufeinanderfolgende Lagerintervalle bei festgelegten Temperaturen. An diesen Reifeprozess schließt sich die Butterung in der Butterungsmaschine (BM) an. Dieser Prozess unterliegt einer ständigen Kühlung, um die mechanische Energie des Schlagens und den von außen eindringenden Wärmestrom abzuführen.

Die Herstellung von Magermilchpulver geschieht durch Eindampfung und Trocknung von vorbehandelter Magermilch. Da bei der Eindampfung (V) ein wesentlich geringerer Energiebedarf als bei der Trocknung erforderlich ist, wird ein möglichst großer Anteil des Wassers (zwei Drittel) mittels Brüdenkompression entzogen. Durch Walzentrocknung (T) wird das restliche Wasser bis zu einer Restfeuchte des Produktes von 5 % ausgetrieben. Dabei wird ein dünner Film der eingedickten Milch auf eine Walze gegeben, welche von innen mit kondensierendem Dampf beaufschlagt wird. Durch die Rotation der Walze gelangt das trocknende Gut zum Abschabmesser, wo es als trockener Film abgeschabt wird. Die Dampftemperatur liegt bei ca. 150 °C.

In der dritten Produktionslinie wird Speiseeis hergestellt. In einem Mischbehälter (EM) werden zunächst die Flüssigkeiten im vorgeschriebenen Verhältnis von Milch, Rahm, Sirup und Wasser zusammengemischt. Im Anschluß wird mit der Erwärmung auf 63 °C unter Zugabe der festen Bestandteile begonnen. Nach Beendigung dieses Vorgangs wird die Substanz homogenisiert und pasteurisiert (H/P) und anschließend den Reifetanks (ER) zugeführt und bei 2 – 5 °C einige Stunden gelagert. Den Tanks ist ein Freezer nachgeschaltet, wo das Eis die gewünschte Konsistenz erhält. Ein einfaches Schaltbild der Gesamtanlage ist in Abbildung 6.1 zu sehen.

In dieser Darstellung des nicht integrierten Prozesses sind alle zuzuführenden Wärmeströme durch einen roten und alle abzuführenden Wärmeströme durch einen blauen Punkt gekennzeichnet. Sowohl für die Butterung als auch für die Speiseeisherstellung sind jeweils 4 parallel angeordnete Fließketten vorhanden. Neben den Zieltemperaturen der Milchprodukte ist die zeitliche Struktur des Prozesses der Abbildung zu entnehmen. Zwei Stunden nach Beginn der Separation von Rohmilch wird der Rahm in die Rahmreifer geleitet und dabei auf eine Temperatur von 23 °C erwärmt. Dieser Vorgang dauert jeweils eine halbe Stunde pro Rahmreifer. Im Sinne einer Wärmeintegration läßt sich die erforderliche Wärmemenge sowohl durch einen entsprechenden Vorlauf in Gegenstromführung zu einem heißen Strom als auch durch einen Heizmantel einbringen. Zweites ist zwar exergetisch ungünstiger, dafür ist der Heizmantel jedoch zugleich Kühlmantel für die anschließende Kühlung auf 6 bzw. 14 °C und benötigt keine zusätzlichen Heizflächen. Diese Tatsache ist für die Modellierung des Wärmeverbrauchers, *aufzuheizender Rahm*, von Bedeutung (vgl. Kapitel 2). Analog verhält es sich mit dem flüssigen Eismix, der im Eismixer (EM) auf 63 °C aufgeheizt werden soll. Sofern eine externe Vorlaufheizung die Produktgüte nicht

negativ beeinflusst, kann dieser Vorgang exergetisch günstig, z.B. von einem 70 °C heißen Strom mit ausreichender Wärmekapazität geleistet werden. Ein solcher heißer Strom wird allerdings nicht in der Lage sein, die erforderliche Wärme in den Eismixer zu transferieren. In Tabelle 6.1 sind die benötigten Daten für das auf der T, \dot{H} -Ebene analysierende Wärmeintegrationsverfahren bereits zusammen gefaßt. Die geforderte Mindesttemperatur beträgt $\Delta T_{min} = 3 K$. Die Modellierung von aufzuheizendem Rahm im Rahmreifer und vom flüssigem Eismix im Eismischer als Ströme erfolgt konservativ.

Strom	T_{ein}	T_{aus}	τ_{anf}	τ_{end}	$\dot{m}c_p$	Q	Q
	°C	°C	h	h	kW/°C	kW	kWh
heiße Ströme							
past. Milch	72	5	7:00	14:00	14,96	1002,32	7016,24
past. Rahm	105	5	7:00	14:00	1,23	123,00	861,00
Brüden(V)	64	5	8:30	16:30	6,10	268,40	2147,20
feuchte Luft(T)	80	30	9:00	17:00	16,00	800,00	6400,00
Kondensat (T)	150	100	9:00	17:00	2,07	103,50	828,00
Eismix (heiß)	85	5	10:00	11:00	5,00	400,00	400,00
	85	5	10:00	11:00	5,00	400,00	400,00
	85	5	10:00	11:00	5,00	400,00	400,00
	85	5	10:00	11:00	5,00	400,00	400,00
kalte Ströme							
Rohmilch	5	55	7:00	14:00	16,19	809,50	5666,50
Magermilch	55	72	7:00	14:00	14,96	254,32	1780,24
Rahm	55	105	7:00	14:00	1,23	61,50	430,50
vorbeh. Milch	5	70	8:30	16:30	8,49	551,85	4414,80
vorbeh. Rahm	40	41	9:00	11:00	54,53	54,53	109,06
Eismix (kalt)	70	71	9:00	10:00	215,00	215,00	860,00
	70	71	11:00	12:00	215,00	215,00	
	70	71	13:00	14:00	215,00	215,00	
	70	71	15:00	11:00	215,00	215,00	
Eismix (warm)	63	85	9:00	10:00	5,00	110,00	440,00
	63	85	11:00	12:00	5,00	110,00	
	63	85	13:00	14:00	5,00	110,00	
	63	85	15:00	11:00	5,00	110,00	

Tabelle 6.1: Zusammenstellung der Stoffdaten des milchwirtschaftlichen Prozesses

Die Tabelle enthält nicht die Ströme, die unterhalb Umgebungstemperatur gekühlt werden, wie die abzuführenden Wärmeströme zur Kühlung der Lager- und Reifetanks RMT, MT, RT, RR und ER sowie zur Kühlung der Butterungsmaschine und des Freezers. Das Tem-

peraturniveau des kalten Eismixes wird zusätzlich um $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ höher angegeben, wodurch eine Abwärmequelle ihre Wärme nur oberhalb von $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ in den Eismischer transferieren kann. Somit wird eine anstelle der geforderten Mindesttemperaturdifferenz von $\Delta T_{min} = 3\text{ K}$ eine von $\Delta T_{min,EM} = 10\text{ K}$ gewährleistet. Entsprechendes gilt für den vorbehandelten Rahm mit einer Mindesttemperaturdifferenz von $\Delta T_{min,vR} = 20\text{ K}$. Neben den Produktströmen wird zusätzlich das bei der Trocknung anfallende Kondensat betrachtet. Es hat ein nutzbares Abwärmepotential gegenüber dem Speisewasserbehälter, in dem das Kondensat bei $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ gesammelt wird. Bei diesem Ansatz wird also nicht versucht den Energieeinsatz für die Trocknung zu reduzieren, sondern die eingesetzte Energie mit den anfallenden Enthalpieströmen des Kondensates und der entweichenden feuchten Luft besser zu nutzen. Diese Enthalpieströme entsprechen quantitativ in etwa der eingesetzten Primärenergie abzüglich der Wärmeverluste, die durch das Produkt entweichen und ungenutzt bleiben. Dabei findet aber qualitativ eine Entwertung statt, diese entsteht zum einen durch die Temperaturdifferenz zwischen $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ heißem Dampf und maximal $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ heißem Zwischenprodukt und zum anderen durch die Vermischung beim produktseitigem Dampf bei $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ und der $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ warmen trockenen Luft. Aufgrund dieser Energieentwertung ist die zuvor eingesetzte Kondensationswärme bei $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ fast vollständig in der feuchten Luft auf einem Temperaturbereich von $80 - 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ verteilt. Dieser Temperaturbereich ist für die Prozesse der restlichen Produktlinien von Interesse.

6.2 Anwendung des Verfahrens

Mit den in Tabelle 6.1 zusammengestellten Daten läßt sich das in Kapitel 4 entwickelte Wärmeintegrationsverfahren durch direkte Wärmeübertragung anwenden. Im Unterschied zu den zuvor betrachteten Modellbeispielen enthält dieser Prozeß Ströme, die innerhalb des Tageszyklus nicht nur in einem Zeitintervall sondern in mehreren Zeitintervallen auftreten. Es sind die Ströme, die aus der Speiseeisproduktion entstehen. Bei der Berechnung der Wärmematrix müssen also stets alle gemeinsamen Zeitintervalle einer Abwärmequelle und eines Wärmeverbrauchers berücksichtigt werden, um zu verhindern, daß z.B. die vier Chargen des kalten Eismixes von vier verschiedenen Abwärmequellen aufgeheizt werden. Algorithmisch läßt sich das Problem im ersten Durchgang sehr einfach wie folgt lösen. Es wird zunächst differenziert zwischen ihx heißen und ikx kalten Stoffströmen, mit denen unterschiedliche Orte verbunden sind, und ih heißen und ik kalten Teilströmen, mit denen unterschiedliche Zeit- und Temperaturintervalle sowie unterschiedliche Wärmekapazitäten verbunden sind. Aus dieser Definition folgt, daß der flüssige Eismix drei verschiedenen Stoffströmen entspricht (kalt, warm und heiß), die insgesamt aus 12 Teilströmen (je 4 Zei-

tintervalle) bestehen. In den bisherigen Beispielen war die Anzahl der Stoffströme stets gleich der Anzahl der Teilströme. Das Berechnungsprogramm stellt dabei eine $(ih \times ik)$ Wärmematrix der Teilströme auf. Bei Stoffpaarungen, bei denen sich die Stoffströme aus mehreren Teilströmen zusammensetzen, ergibt die Summe der Elemente die über den gesamten Zeitraum übertragbare Wärmemenge. Am Beispiel des heißen und des warmen Eismix soll die Transformation von der Wärmematrix der Teilströme zur Wärmematrix der Stoffströme verdeutlicht werden.

$$Q_{\text{Teilstrom}} = \begin{bmatrix} q_{EM,1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_{EM,2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{EM,3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{EM,4} \end{bmatrix} \rightsquigarrow Q_{\text{Stoffstrom}} = \left[\sum_{i=1}^4 q_{EM,i} \right]$$

Abbildung 6.2: Transformation der Wärmematrix

Die vier Teilströme des warmen Eismixes liegen jeweils in den gleichen Zeitintervallen der entsprechenden vier Teilströme des heißen Eismixes. Daher ist die Wärmematrix der Teilströme nur auf der Diagonalen mit Elementen ungleich Null, also $Q_{i,i} \neq 0$ besetzt. Aufgrund dieser Tatsache läßt sich die Wärmematrix der Stoffströme als Summe der Diagonalen bestimmen. Betrachtet man nun die (1×4) Wärmematrix zwischen der feuchten Luft des Trockners und des warmen Eismixes, so enthält sie vier Nicht-Null-Elemente à 70 kWh . Die resultierende Wärmematrix der Stoffströme entartet auch hier zu einem Element, welches aus der Summe der vier Teilelemente gebildet wird. Eine Verschaltung zwischen diesen beiden Stoffen nach Verschaltungstyp 3 führt dabei zu einer Aufspaltung des feuchten Luftstromes in einen Teilstrom mit einem Wärmekapazitätsstrom von 5 kW/K , welcher zu gegebenen Zeiten den warmen Eismix von $63 \text{ }^\circ\text{C}$ auf $77 \text{ }^\circ\text{C}$ unter Berücksichtigung einer Mindesttemperaturdifferenz von $T_{\min} = 3 \text{ K}$ aufheizt. Dabei wird die feuchte Luft auf $66 \text{ }^\circ\text{C}$ abgekühlt und bietet in den jeweiligen Zeitintervallen ein weiteres Abwärmepotential. Als Restströme dieser Verschaltung verbleiben somit, diejenigen Teilströme, die zu anderen Zeiten fließen als der Eismix, und diejenigen Teilströme, die zu diesen Zeiten fließen. Diese sind zum einen solche, die nicht verschaltet wurden und einen Wärmekapazitätsstrom von $(\dot{m}c_p)_{\text{Rest}} = 16 - 5 = 11 \text{ kWh}$ besitzen, und solche, die verschaltet wurden. Das Programm faßt die beiden Ströme im Temperaturintervall $66 \rightarrow 30 \text{ }^\circ\text{C}$ zusammen und führt zu der Teilung gemäß Abbildung 6.3.

Die Verschaltung mit dem warmen Eismix führt insgesamt zu 12 Restströmen. Aus diesen Teilströmen läßt sich beispielsweise eine Wärmematrix mit dem vorbehandelten Rahm zur Butterproduktion, der im Zeitraum 9-11 h von $5 \text{ }^\circ\text{C}$ auf $23 \text{ }^\circ\text{C}$ aufgeheizt werden muß,

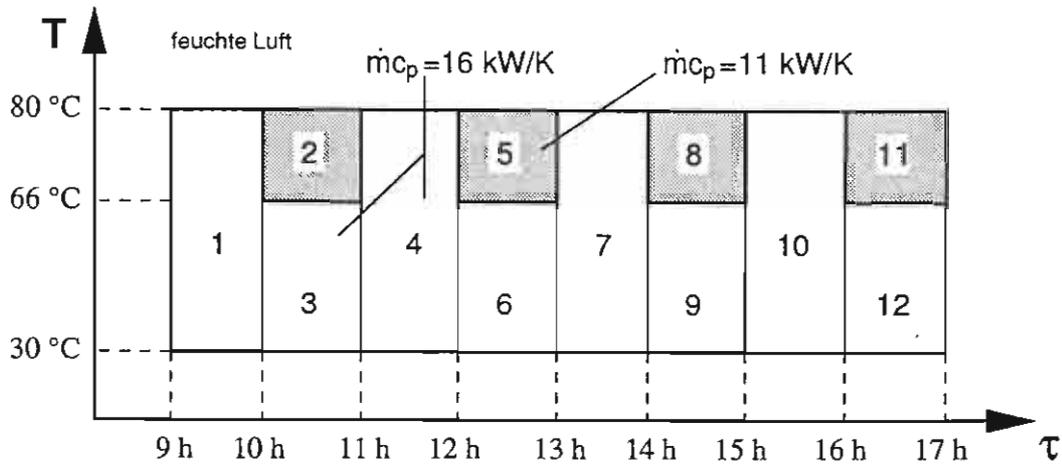


Abbildung 6.3: Reststromaufteilung der feuchten Luft nach Verschaltung

aufstellen. Dieser wurde wiederum konservativ modelliert, so daß er auch ohne Gegenstromführung sondern im Rahmreifer erhitzt werden kann. Im Zeitraum von 9-10 h steht für diese Aufgabe Teilstrom 1 der feuchten Luft zur Verfügung. Im verbleibenden Zeitraum können sowohl Teilstrom 2 als auch Teilstrom 3 den erforderlichen Wärmestrom liefern. Das entsprechende Element der Wärmematrix zwischen Stoffstrom *feuchte Luft* und *vorbehandelter Rahm* ist somit nicht mehr gleich der Summe der Elemente der Teilstrommatrix. Diese Transformation ist genau dann nicht zulässig, wenn Teilströme des gleichen Stoffes in demselben Zeitintervall existieren. Das bestehende Verfahren ist daher, für die rekursive Aufstellung der Stoffstrommatrix bei Stromteilung prinzipiell nicht geeignet. Die Konsequenz daraus, daß nicht die Stoffstrommatrix sondern die Teilstrommatrix aufgestellt wird, ist eine Verkomplizierung der Verschaltungen. Abhilfe konnte auf zwei Arten geleistet werden. Zum einen wurde das Programm um einen Algorithmus erweitert, welcher direkt die Stoffstrommatrix berechnet, jedoch prinzipbedingt bei der Verschaltung zu höheren Exergieverlusten führt. Zum anderen besteht die Möglichkeit, die Verschaltungen, wie gehabt, aus der Teilstrommatrix zu bestimmen und diesen Verschaltungen einen sehr großen Gewichtungsfaktor zu geben, z.B. $g_{i,j} = 10000$. Damit wird sichergestellt, daß alle weiteren möglichen Verschaltungen dieser Stoffkombination gewählt werden. Aber auch diese Variante führt gegebenenfalls zu nicht optimalen Gütegraden, da sie exergetisch günstigere Verschaltungen verhindert. Die wohl sicherste Methode zu einem guten Ergebnis zu kommen, ist das interaktive Eingreifen des Anwenders in die Methodenvielfalt des Verfahrens.

Ein erster Rechengang des Wärmeintegrationsprogramms mit uneingeschränkten Verschaltungsmöglichkeiten, also $g_{i,j} = 1$ für alle i, j , vollständiger *Parallelisierung* und Restwärmeebenutzung nach Verschaltungstyp 3 führt erwartungsgemäß zu einem Netzwerk mit dem

exergetischen Gütegrad von $Y = 1$. Das Auswahlverfahren der *ungarischen Methode* bestimmt 17 Stoffpaarungen mit 87 Zeitschaltungen, die insgesamt eine Wärmemenge von 13462 kWh pro Tag übertragen. Dabei verbleibt eine Heizmenge von 239 kWh und eine Kühlmenge von 5556 kWh. Die bisher in der statistischen Untersuchung vernachlässigte Größe der Zeitschaltungen, die entscheidend für die Prozeßsteuerung ist, läßt sich effizient mit dem Auswahlverfahren des größten Wärmeübertragers reduzieren. Bei gleichem Gütegrad führt dieses Verfahren zu 14 Stoffpaarungen mit nur 42 Zeitschaltungen. Tabelle 6.2 faßt das Ergebnis dieses Rechengangs zusammen.

Verbraucher	Abwärmequelle	Q_{Gesamt}	$Q_{W\ddot{U}}$	Q_{Rest}	$n_{W\ddot{U}}$	n_{Schalt}
Rohmilch	p.Milch, p.Rahm	5666,50	5666,50	0,00	2	2
Magermilch	p.Milch, f.Luft	1780,24	1674,37	105,88	2	6
Rahm	p.Rahm, Kondensat	430,50	412,05	18,45	2	3
v.Milch	f.Luft, Brüden, Eismix(h)	4414,80	4272,88	141,92	3	14
v.Rahm	Brüden	109,06	109,06	0,00	1	1
Eismix(k)	Kondensat, f.Luft	860,00	827,60	32,40	2	8
Eismix(w)	Eismix(h), Kondensat	440,00	440,00	0,00	2	8
$\Sigma / [kWh]$		13701,10	13402,66	298,45	14	42

Tabelle 6.2: Wärmebilanz

Aus dieser Tabelle werden die Stoffpaarung bei der Wärmeintegration ersichtlich. Die pasteurisierte Milch wird dazu verwendet, die Magermilch und die Rohmilch im Gegenstrom aufzuheizen. Entsprechend werden pasteurisierter Rahm und heißer Eismix mit Rohmilch und Rahm bzw. warmen Eismix verschaltet. Diese Verschaltungen wählt das Programm in den ersten Durchgängen mit *Parallelisierung*, da sich die jeweiligen Temperaturbereiche deutlich überschneiden. Des weiteren werden feuchte Luft, Brüden und heißer Eismix dazu verwendet, die vorbehandelte Milch auf dem Weg zum Verdampfer aufzuheizen. Speziell die Verschaltung mit dem Eismix führt aufgrund seiner zyklischen Verfügbarkeit zu einer Vielzahl von Restströmen, wodurch sich die hohe Anzahl von 14 Verschaltungen mit unterschiedlichen Zeiten und Temperaturen begründet. Die Antriebswärmen für die Pasteurisierung von Rahm und Magermilch können von der feuchten Luft und dem Kondensat aus dem Trocknungsprozeß nur in der Zeit von 9-14 h geliefert werden. Dies allerdings durch die *Parallelisierung* bedingt mit hohem Verschaltungsaufwand. Eine Einschränkung der *Parallelisierung* auf beispielsweise $i_P = 8$ Durchgänge führt zu einem leicht reduzierten Gütegrad mit wesentlich vereinfachter Verschaltung. Diese sind im folgenden als Auszug der Programmausgabe aufgelistet.

Waermeuebertrager

Nr.	h.Str.	k.Str.	(To)h	(Tu)h	(To)k	T(u)k	tein	taus	dq[kW]	Q[kWh]
1	p.Milch	Rohmilch	58.00	8.00	55.00	5.00	7.00	14.00	748.00	5236.00
5	p.Rahm	Rohmilch	58.00	8.00	55.00	5.00	7.00	14.00	61.50	430.50
3	p.Milch	Magermilch	72.00	58.00	69.00	55.00	7.00	14.00	209.44	1466.08
17	f.Luft	Magermilch	75.81	73.00	72.00	69.00	9.00	14.00	44.88	224.40
6	p.Rahm	Rahm	105.00	58.00	102.00	55.00	7.00	14.00	57.81	404.67
28	Kondensat	Rahm	108.00	105.00	105.00	102.00	10.00	11.00	3.69	3.69
29	Kondensat	Rahm	108.00	105.00	105.00	102.00	12.00	13.00	3.69	3.69
2	f.Luft	v.Milch	73.00	30.00	70.00	27.00	9.00	16.50	365.07	2738.03
4	Brueden	v.Milch	30.00	20.00	27.00	17.00	9.00	16.50	61.00	457.50
11	Brueden	v.Milch	64.00	20.00	61.00	17.00	8.50	9.00	268.40	134.20
12	Brueden	v.Milch	64.00	30.00	17.00	5.00	9.00	16.50	101.88	764.10
18	Brueden	v.Milch	37.70	30.00	27.00	17.00	9.00	16.50	23.90	179.25
19	Brueden	v.Rahm	60.57	43.00	41.00	40.00	9.00	11.00	54.53	109.06
13	Kondensat	Eismix(k)	150.00	90.00	71.00	70.42	9.00	10.00	124.20	124.20
14	Kondensat	Eismix(k)	150.00	90.00	71.00	70.42	11.00	12.00	124.20	124.20
15	Kondensat	Eismix(k)	150.00	90.00	71.00	70.42	13.00	14.00	124.20	124.20
16	Kondensat	Eismix(k)	150.00	90.00	71.00	70.42	15.00	16.00	124.20	124.20
20	f.Luft	Eismix(k)	78.68	73.00	70.42	70.00	15.00	16.00	90.80	90.80
21	f.Luft	Eismix(k)	80.00	75.81	70.42	70.11	9.00	10.00	67.12	67.12
22	f.Luft	Eismix(k)	80.00	75.81	70.42	70.11	11.00	12.00	67.12	67.12
23	f.Luft	Eismix(k)	80.00	75.81	70.42	70.11	13.00	14.00	67.12	67.12
7	Eismix(h)	Eismix(w)	85.00	66.00	82.00	63.00	10.00	11.00	95.00	95.00
8	Eismix(h)	Eismix(w)	85.00	66.00	82.00	63.00	12.00	13.00	95.00	95.00
9	Eismix(h)	Eismix(w)	85.00	66.00	82.00	63.00	14.00	15.00	95.00	95.00
10	Eismix(h)	Eismix(w)	85.00	66.00	82.00	63.00	16.00	17.00	95.00	95.00
24	Kondensat	Eismix(w)	97.25	90.00	85.00	82.00	10.00	11.00	15.00	15.00
25	Kondensat	Eismix(w)	97.25	90.00	85.00	82.00	12.00	13.00	15.00	15.00
26	Kondensat	Eismix(w)	97.25	90.00	85.00	82.00	14.00	15.00	15.00	15.00
27	Kondensat	Eismix(w)	97.25	90.00	85.00	82.00	16.00	17.00	15.00	15.00

Die vergebenen Nummern für die Verschaltungen entsprechen der Reihenfolge in der sie vom Programm gewählt wurden. Die ersten 11 Verschaltungen wurden mittels *Parallelisierung* in den ersten 8 Durchgängen bestimmt (Durchgang 7 führte zu 4 Wärmeübertragern!) und entsprechen z.B. bei der Separation sowie bei der Pasteurisierung von Milch, Rahm und Eismix einer einfachen Wärmerückgewinnung. Diese Verschaltungen erreichen bereits einen Gütegrad von 59,1 %. Weitere 20,4 % werden durch den Wärmeübertrager Nr. 2 übertragen. Dabei wird ein Teil der feuchten Luft über die vorbehandelte Milch auf dem Weg zur Eindampfung geleitet. Dadurch daß die vorbehandelte Milch nicht vom heißen Eismix aufgeheizt wird, reduziert sich die Anzahl zeitlich verschiedenen Verschaltungen im Vergleich zur vollständigen *Parallelisierung* von 14 auf 5. Eine weitere Vereinfachung dieser unvollständigen *Parallelisierung* führt dazu, daß zur Aufheizung der Magermilch sich nur noch 1 statt 5 Verschaltungen mit der feuchten Luft ergeben. Diese vereinfachte Verschaltung führt auf der anderen Seite jedoch zu einem Gütegradverlust, der durch eine mangelnde Aufheizung des kalten Eismixes erkennbar ist. Im Vergleich zum MHX-Netzwerk bleibt eine Wärmemenge von $Q_{Verlust} = 3 \cdot 7,51 = 22,53 \text{ kWh}$ ungenutzt. Sie findet sich im Reststrom der feuchten Luft im Temperaturbereich von 72 bis 73 °C am

Pinch der Zeitintervalle 9-10 h, 11-12 h und 13-14 h wieder. Diese Wärme könnte bei der geforderten Mindesttemperaturdifferenz von $\Delta T_{min} = 3 K$ zum Aufheizen der Magermilch ab $T = 69 \text{ }^\circ\text{C}$ genutzt werden. Entsprechend größer wäre die nutzbare Wärme der feuchten Luft zur Aufheizung des kalten Eismixes. Für diesen Vorgang wurde eine Mindesttemperatur von $\Delta T_{min,EM} = 10 K$ gefordert, was durch die Vorgabe, den Eismix von 70 auf 71 $^\circ\text{C}$ statt auf 63 $^\circ\text{C}$ aufzuheizen, auf der T, \dot{H} -Ebene realisiert wird. Durch das Herabsetzen dieser Begrenzung auf beispielsweise $\Delta T_{min,EM} = 9 K$ kann dieser *bottleneck* umgangen werden. An diesem Punkt sind die Grenzen des Verfahrens erreicht. Die vorgeschlagenen Verschaltungen müssen nun weiter „von Hand“ vereinfacht und in ein Schaltbild überführt werden. In Abbildung 6.4 sind die vom Programm bestimmten Verschaltungen grafisch dargestellt.

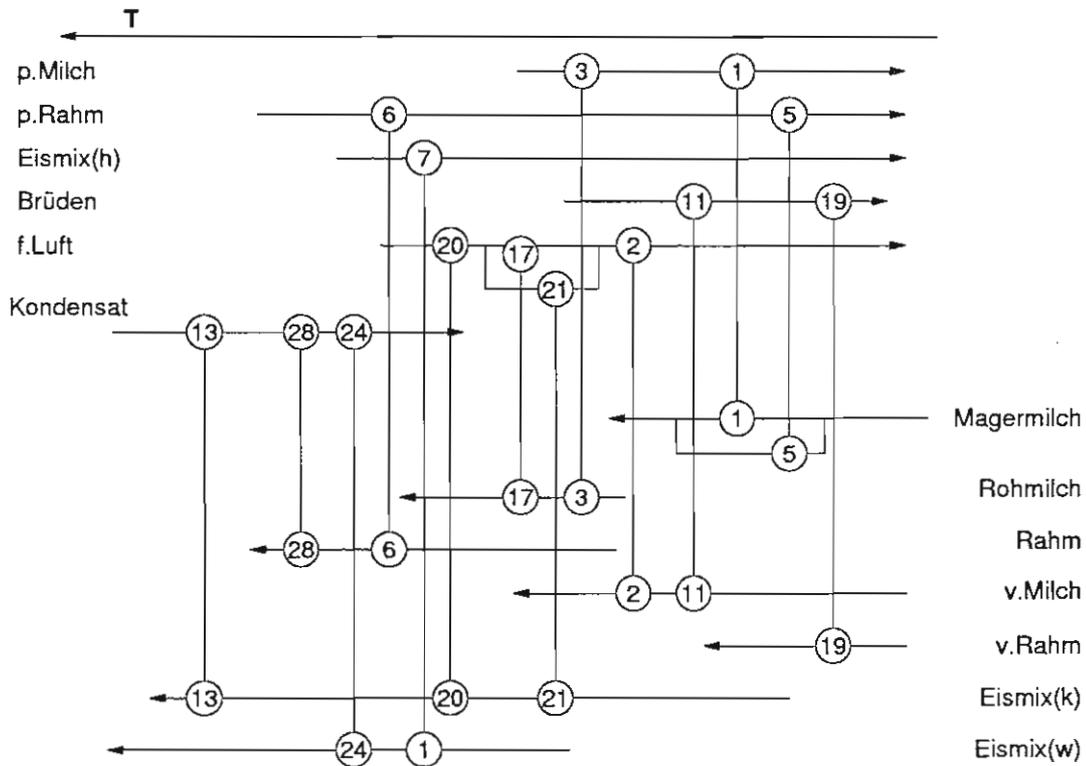


Abbildung 6.4: Verschaltungen des milchwirtschaftlichen Prozesses

Die Numerierung der Verschaltungen entspricht der aus der Programmausgabe. Identische Verschaltungen, die zeitlich mehrfach auftreten, wurden gemäß einer technischen denkbaren Ausführung nur einfach dargestellt, z.B. Verschaltung 13, 14, 15 und 16 zwischen Kondensat und kaltem Eismix. Dahingegen wurde für Verschaltung 20 zwischen feuchter Luft und kaltem Eismix aufgrund unterschiedlicher Ein- und Austrittszustände ein gesonderter Wärmeübertrager eingezeichnet. Damit wird auf die Schwierigkeit hingewiesen bei

der Dimensionierung eines Wärmeübertragers, der sowohl Verschaltung 20 als auch den Verschaltungen 21, 22 und 23 gerecht wird. Zu Berücksichtigen ist ebenfalls, daß die Temperatur des kalten Eismixes nicht im Bereich von $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt sondern zwischen 15 und $63\text{ }^{\circ}\text{C}$. Gleiches gilt für den vorbehandelten Rahm. Die Verschaltung von Brüden und vorbehandelter Milch wurde beschränkt auf Verschaltung 11, da alle anderen Verschaltungen im Zeitintervall $9:00-16:30\text{ h}$ ebenfalls von der feuchten Luft geleistet werden können. Das Fließbild des integrierten Prozesses zeigt Abbildung 6.5.

Im Vergleich zum nicht integrierten Prozeß wird durch die Wärmeintegration ein erheblicher Teil der Betriebsmittel eingespart. Die Wärmeübertrager sind durch die blauen und roten Verbindungslinien mit den weiß gefüllten Kreisen dargestellt. Die blauen Verbindungen zeigen die Wärmerückgewinnung innerhalb der Prozeßlinien auf, während die roten Verbindungen die einzelnen Prozesse miteinander verknüpfen und somit einen weiteren Teil der Energieeinsparung liefern. Hauptantriebsquellen des integrierten Prozesses sind die technische Arbeit für die Brüdenkompression im Verdampfer und der in den Trockner eingebrachte Dampf. Die gewählten Verschaltungen stellen Dampfleitungen zur Verfügung, um den restlichen Wärmebedarf zentral zu versorgen. Dadurch werden keine weiteren externen Heizungen und damit verbundene Wärmeübertrager benötigt.

Speicher und Wärmepumpen

Die Wärmebilanz nach Tabelle 6.2 zeigt den nach der vollständigen Wärmeintegration durch direkte Wärmeübertragung verbleibenden Wärmebedarf der Anlage auf. Es ist eine Wärmemenge von $Q_{Heiz} = 298,45\text{ kWh}$ pro Tag, die aufgrund der Zeitstruktur nicht von den Abwärmequellen der Milchpulverproduktion aufgebracht werden kann, und wird bei der Pasteurisation nach der Separation von Magermilch und Rahm in der Zeit von $7:00-9:00\text{ h}$ sowie bei der Vorwärmung der vorbehandelten Milch auf dem Weg zum Verdampfer von $8:30-9:00\text{ h}$ benötigt. Die separierte Magermilch und die vorbehandelte Milch können z.B. von einem Hilfskreislauf des Speiswasserbehälters beheizt werden, da die Temperatur des Speisewassers in diesem Fall mit $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ deutlich über dem geforderten Temperaturniveau liegt. Dieser Speicher bietet zugleich die Möglichkeit die Verschaltungen dahingehend zu vereinfachen, daß der Eismix im Eismischer auf die geforderte Temperatur von $63\text{ }^{\circ}\text{C}$ aufgeheizt wird und somit sich die Anzahl der Heizquellen für diesen Vorgang um eins erniedrigt. Die Aufheizung des Rahm hingegen erfordert einen gesonderten Speicher, der die Wärme des heißen Kondensats bei einer Temperatur oberhalb von $108\text{ }^{\circ}\text{C}$ speichert.

Die Berücksichtigung von Kältemaschinen zur Wärmeabfuhr unterhalb der Umgebungstemperatur erfordert eine gesonderte Betrachtung. Eine Kältemaschine entzieht Wärme auf

niedrigen Temperaturniveau und gibt sie unter Zufuhr von mechanischer Arbeit auf einem höheren Temperaturniveau wieder ab. Sie werden also im Rahmen einer Wärmeintegration dann interessant, wenn Kühl- und Heizbedarf gleichzeitig auftreten. Der Heizbedarf wurde innerhalb der gesteckten Systemgrenzen für den milchwirtschaftlichen Prozeß jedoch durch prozeßinterne Wärmeübertragung bereits gedeckt. Weitere Wärmeverbraucher, die bislang nicht berücksichtigt wurden, sind jedoch Raumheizung und die Warmwasserbereitstellung. Diese lassen sich durch den bivalenten Betrieb der Kältemaschinen bzw. Wärmepumpen sicherstellen. Wie sich allerdings in diesem Beispiel des milchwirtschaftlichen Prozesses zeigt, liegt die Hauptaufgabe des Wärmeintegrationsprogramms in der direkten Verschaltung von Abwärmequellen und Wärmeverbrauchern. Der Einsatz von Speichern und Wärmepumpen hat bei der Wärmeintegrationsanalyse einen hohen Stellenwert. Die Unterstützung des Programms ist hier jedoch nicht weiter von Bedeutung, da die Komplexität des Problems nicht gegeben ist.

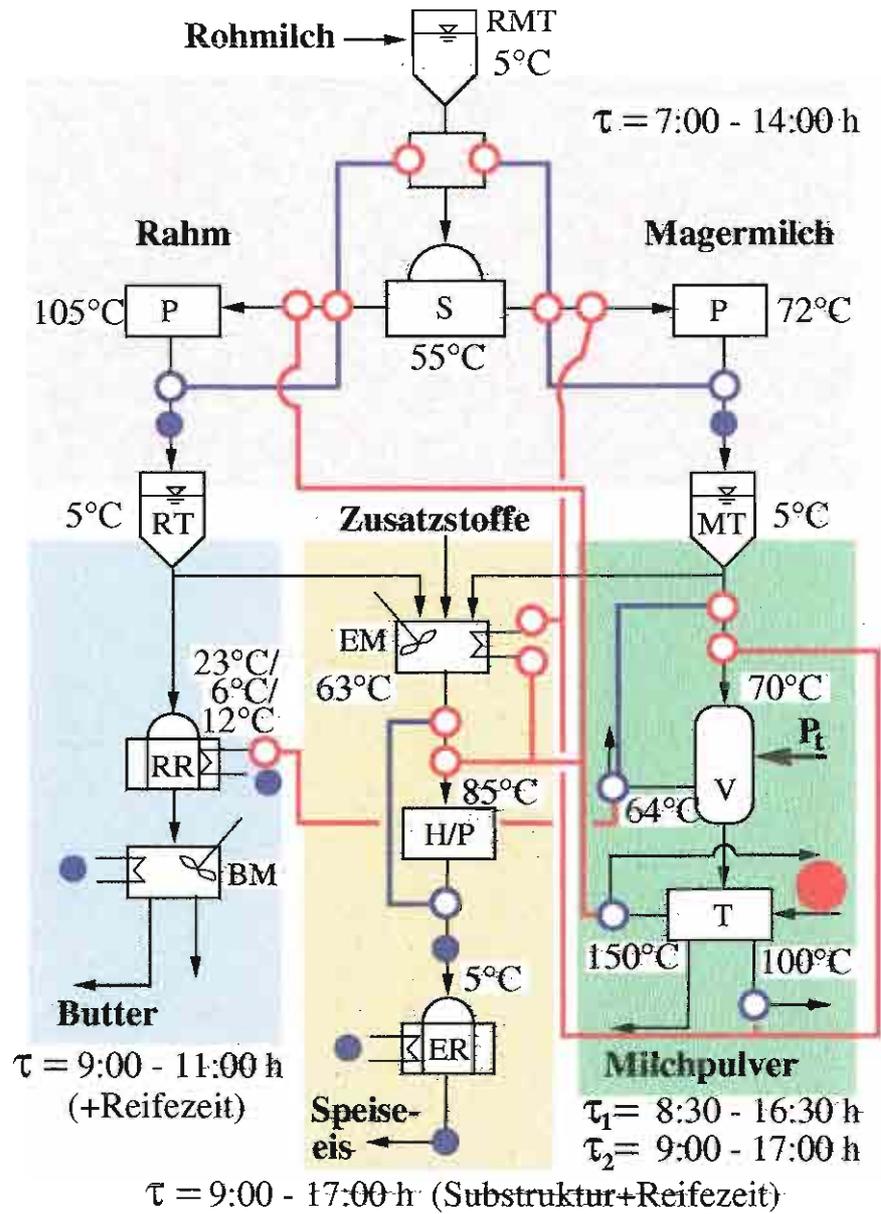


Abbildung 6.5: Fließbild des integrierten Prozesses

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Zielsetzung des Forschungsvorhaben war die wissenschaftliche Erforschung der Wärmeintegration bei *Batch*-Prozessen und ihre Analyse durch eine system-analytische, computergestützte Methode. Ausgehend von den bekannten Ansätzen, der thermodynamischen *Pinch*-Methode und des algorithmischen OMNIUM-Verfahrens wurde eine neues Verfahren entwickelt, welches im Stande ist, aus Wärmeübertragern, Speichern und Wärmepumpen bestehende Netzwerke mit beliebig hohem exergetischen Gütegrad bei gleichzeitiger Erhöhung der Komplexität zu generieren. Ein großer Vorteil der *Pinch*-Methode ist die einfache Bereitstellung von Energiezielen. Diese Energieziele, also die mindestens zuzuführende und abzuführende Wärme sowie die übertragbare Wärme, stellen einen Maßstab für die exergetische Qualität aller denkbaren Netzwerke dar. Die Ermittlung eines geeigneten Netzwerkes nach der *Pinch*-Methode ist allerdings zu aufwendig und in zu geringem Umfang algorithmisierbar. Eine sukzessive Anwendung des Zuordnungsverfahren nach der *ungarischen*-Methode erstellt hingegen Netzwerke, ohne Kenntnis über die exergetische Güte der Verschaltungen. Die einhergehenden *Pinch*-Verletzungen werden bei OMNIUM nicht berücksichtigt. Neben der rekursiven Anwendung dieses Verfahrens wurde daher die Minimierung der Exergieverluste untersucht. Diese Verluste treten in zweifacher Weise auf: Zum einen ergeben sie sich durch zu große intern übertragene Wärmemengen und zum anderen aufgrund ungünstiger Verschaltung. Die Wahl des Verschaltungstyps bei maximal intern übertragbarer Wärme, kann bereits den exergetischen Gütegrad des Netzwerkes erheblich beeinflussen. Die optimierten Verschaltungen führen zu geringsten Temperaturdifferenzen unter der Randbedingung, die größt mögliche Wärme vom heißen Strom zum kalten Strom zu übertragen. Diese Randbedingung führt jedoch bei sehr unterschiedlichen Temperaturniveaus der Abwärmequelle und des Wärmeverbrauchers zu hohen exergetischen Verlusten. Erst die Einschränkung zunächst nur solche Verschaltungen mit identi-

schem Temperaturbereich zu betrachten, vermeidet mittels *Parallelisierung* zu große Exergieverluste. Die vollständige *Parallelisierung*, also die Wärmeübertragung zweier Stoffe mit identischem Wärmekapazitätsstrom in einem gemeinsamen Temperaturintervall führt zur Aufspaltung in ein Subsystem oberhalb des *Pinch* und eines unterhalb des *Pinch*. Durch die Trennung dieser Systeme kann mit anschließender Nutzung der Restwärme stets ein MHX-Netzwerk generiert werden. Das Berechnungsprogramm bietet dabei die Möglichkeit je nach Zielgrößen eine mehr oder weniger vollständige *Parallelisierung* durch Vorgabe der Anzahl der Durchgänge mit *parallelisierten* Verschaltung durchzuführen. Die statistische Untersuchung der Ergebnisse des Verfahrens mittels Zufallsprozessen bestätigte den Zusammenhang zwischen exergetischem Gütegrad und Komplexität des Netzwerkes. Jedoch wurde ebenfalls deutlich, daß die *ungarische*-Methode zur Generierung einfacher Netzwerke ein Hindernis darstellt, da sie ebenfalls sehr kleine Wärmeübertrager berücksichtigt. Das einfache Auswahlverfahren des größten Wärmeübertragers führte bei vorgegebenen Gütegraden zu vergleichsweise einfachen Netzwerken. Das Potential dieses Methoden zur exergetischen Optimierung sowie zum Auswahlverfahren wurde bei der Anwendung auf die in der Literatur bekannten Modellbeispiele A und B sowie auf den milchwirtschaftlichen Prozeß in Kapitel 6 bestätigt. Eine Übertragung dieser Verfahren auf die Verwendung von ideal geschichteten Verdrängungsspeichern war, wie Kapitel 5 zeigt, möglich. Durch die Elimination der Variablen Zeit konnte eine Analogie zwischen Wärmeübertragung auf T, \dot{H} -Ebene und Speichern auf T, H -Ebene hergestellt werden. Die *Parallelisierung* findet zunächst im T, H -Diagramm durch eine Teilung der Wärmekapazitäten anstelle von Wärmekapazitätsströmen statt. Diese Teilung ist bei Speichern allerdings keine Aufspaltung der Ströme sondern eine Aufteilung in Zeitintervalle. Das Verfahren ermittelt für die Speicher die zu speichernden Wärmemengen sowie den Temperaturbereich, welcher ohne *Parallelisierung* nicht eindeutig bestimmt ist. Diese Wahl der Temperaturspreizung des Speichers hat innerhalb der gegebenen Grenzen keinen Einfluß auf den Exergieverlust. Der Wärmeträgerkreislauf läßt sich mit den entsprechenden Zeiten für das Auf- und Entladen des Speichers berechnen. Die Anwendung auf die Modellbeispiele A und B zeigt auf, wie die Speicher in das Verfahren implementiert wurden. Durchgänge mit Speichern schließen an beliebig vielen Durchgängen mit direkter Wärmeübertragung an. Während im Modellbeispiel A ausschließlich Speicher Verwendung finden, wird im Modellbeispiel B zunächst das MHX-Netzwerk mit direkter Wärmeübertragung generiert, um anschließend aus den verbleibenden Restströmen zwei weitere Speicher zu ermitteln. Als weiteres Instrument der Wärmeintegration wurden Wärmepumpen in das Verfahren eingebunden. Nach dem keine weitere Wärme mehr prozeßintern durch direkte Wärmeübertragung oder Speicher übertragen werden kann, wird ein wirtschaftlicher Einsatz von Wärmepumpen überprüft. Dazu müssen die Temperaturniveaus von Abwärmequelle und Wärmeverbraucher dicht genug

bei einander liegen. Als Kriterium eines wirtschaftlichen Einsatzes wird die Leistungsziffer einer möglichen Wärmepumpe zwischen zwei Strömen berechnet. Bei Leistungsziffern größer als eine geforderte Mindestleistungsziffer gilt diese Wärmepumpe als wirtschaftlich und kann vom Auswahlverfahren innerhalb einer Wärmematrix bestimmt werden. Als Ergebnis liefert das Programm von jeder Wärmepumpe die zur Dimensionierung notwendigen Kenndaten, wie z.B. die eingesetzte mechanische Arbeit sowie die übertragenen Wärmemengen.

Als Produkt dieser Forschungsvorhabens wurde eine Wärmeintegrationsverfahren für *Batch*-Prozesse entwickelt, welches die Energieziele sukzessive durch rekursives Anwenden des Zuordnungsproblems mit exergetisch optimalen Verschaltungen realisiert. Dabei können alle Instrumente der Wärmeintegration berücksichtigt werden. Eine Vielzahl von Freiheitsgraden helfen dem Anwender, sein definiertes Optimum zu finden. In dem Beispiel eines milchwirtschaftlichen Prozesses wird diese Vorgehensweise deutlich. Ausgehend vom maximalen exergetischen Gütegrad wurde das Netzwerk mit der geringsten Verschaltungen gesucht. Diese numerische Lösung ist als Vorschlag eines Netzwerkes zu bewerten, welcher den lokalen Bedingungen des Prozesses anzupassen ist, d.h. exergetisch optimierte Verschaltungen werden wirtschaftlich optimiert, ohne das Gesamtergebnis zu verschlechtern. Analog ist die Vorgehensweise bei Speichern, die neben der Dimensionierung der Speicher eine Auslegung der Wärmeträgerkreisläufe erfordern. Diese Aufgabe wurde bewusst dem Anwender überlassen, da dies in der Regel zu wirtschaftlicheren Netzwerken führt.

Auf dem bisherigen Entwicklungsstand ist das Programm unvollkommen, was den Automationsgrad betrifft. So kann das Programm nicht selbstständig dasjenige Netzwerk finden, welches bei vorgegebenem Gütegrad die geringste Anzahl von Wärmeübertragern besitzt. Ein weiterer Gesichtspunkt, für die Weiterentwicklung des Programms, ist die Automatisierung von Relaxationsschritten hin zu wirtschaftlich optimalen Lösungen. Dieser Vorgehensweise ist ein Verfahren mit zu maximierender Wirtschaftlichkeitsmatrix gegenüberzustellen.

Literaturverzeichnis

- [1] LTD, ESDU INTERNATIONAL: *Process Integration: Process Change and Batch Processes*. ESDU Data Item No. 90033, *.
- [2] KEMP, I.C.: *Some Aspects of the Practical Application of Pinch Technology Methods*. Trans. IChemE, 69:471–479, 1991.
- [3] KEMP, I.C.; DEAKIN, A.W.: *The Cascade Analysis for Energy and Process Integration of Batch Processes*. Chem. Engng. Res. Des., 67:495–525, 1989.
- [4] HELLWIG, T.; THÖNE, E.: *Omnium : Ein Verfahren zur Optimierung der Abwärmennutzung*. BWK, 46:393–397, 1994.
- [5] LUCAS, K.: *Thermodynamik, Die Grundgesetze der Energie- und Stoffumwandlungen*. Springer-Verlag, 1995.
- [6] LINNHOFF, B.; TOWNSEND, D.W.; BOLAND D.: *A USER GUIDE on Process Integration for the Efficient Use of Energy*. The Institution of Chemical Engineers, England, 1988.
- [7] GROSSMANN, I. E.: *Mixed-Integer Programming Approach for the Synthesis of integrated Process Flowsheets*. Comp. Chem. Engng., 9:463–82, 1985.
- [8] RAMAN, R.; GROSSMANN, I.E.: *Integration of Logic and Heuristic Knowledge in MINLP Optimization for Process Synthesis*. Comp. Chem. Engng., 16:155–71, 1992.
- [9] HESSELMANN, K.: *Wärmetauschernetzwerke eine Exergoökonomische Betrachtung*. RWTH Aachen, 1985.
- [10] SCHWEFEL, H.-P.: *Numerische Optimierung von Computermodellen mittels der Evolutionsstrategie*. Birkhäuser, Stuttgart, 1977.
- [11] LINNHOFF, B.: *Pinch Analysis - a state of the art overview*. TransIChemE, 71, Part A, September 1993.

- [12] BRONSTEIN, I.N.; SEMENDJAJEW, K.A.: *Taschenbuch der Mathematik: ergänzende Kapitel. 6. Auflage.* BSB B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1979.
- [13] UHLENBRUCK, ST.: *Vergleich verschiedener Strategien zur Wärmeintegration bei Batch-Prozessen.* Diplomarbeit, Fachgebiet Thermodynamik, Universität Duisburg, 1995.
- [14] FRANK, A.; HOHENDORF, H; MODEREGGER H.; TRENKOWITZ G.: *Anwendung der Wärmepumpe in Industrie, Gewerbe und Landwirtschaft.* Verlag C. F. Müller Karlsruhe, Wärmepumpen, Band 7, 1984.