

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



Einsatz der Pinch-Methode in der Haustechnik

Vorgehen mit Fallbeispiel

ausgearbeitet durch
Urs Hofstetter
Helbling AG
Hohlstrasse 610, Postfach, 8048 Zürich
uho@helbling.ch

im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

Zusammenfassung

Die Pinch-Methode (PM) als Systemmethode optimiert durch die gleichzeitige Betrachtung von Technik und Ökonomie Gesamtsysteme. Je komplexer diese Systeme sind, desto unentbehrlicher wird die PM, um überhaupt zu optimalen Ergebnissen zu kommen. Durch den grundsätzlichen Ansatz mit Definition der Prozessanforderungen sind völlig neue Lösungen von bisher konventionellen Anlagen auffindbar. Ihr Nutzen ist in der Industrie kombiniert mit der dortigen Haustechnik unbestritten. Hingegen war ihr konkreter Nutzen in der komplexen Haustechnik, wo neben der klassischen Simulationsoptimierung auch die Strukturoptimierung einen Stellenwert besitzt, noch unklar. Dieses Handbuch will durch theoretische und praktische Arbeiten anhand eines konkreten haustechnischen Objekts Einsatzmöglichkeiten der PM aufzeigen.

Mittels der Durchführung der Pinch-Analyse am Fallbeispiel Forschungslabor Paul-Scherrer-Institut konnte eine Vorgehensmethodik entwickelt werden, die in diesem Handbuch exemplarisch am Fallbeispiel vordemonstriert wird, und zwar derart, dass der in der PM versierte Fachmann diese Vorgehensweise auf eine anderes Haustechnikobjekt übertragen und selbständig durchführen kann. Dabei wurde ein strikt hierarchisches Vorgehen befolgt - sogenanntes Zwiebschalenmodell - indem ausgehend von den eigentlichen Prozessen, die beim Haustechnikobjekt durch die verschiedenen Wärme- und Kälteverbrauchergruppen (z.B. Warmwasseraufbereitung, Raumheizung,...) repräsentiert sind, nacheinander mit entsprechend abnehmender Priorität, das Prozesswärmetauschnetz, die Wärmespeicher und die Infrastrukturelemente (z.B. Fernheizung) ausgelegt und optimiert wurden.

Die Hauptschwierigkeit lag darin, die Diskontinuität der einzelnen Prozesse, die u.a. durch schwankende Aussentemperatur, variabler Nutzungsgrad hervorgerufen wird, in geeigneter Form respektive mit so geringem Aufwand wie möglich aber dennoch möglichst exakt mit zu berücksichtigen. Eine Einteilung in einzelne, signifikant Zustände, die dann als stationär betrachtet werden, hat sich am sinnvollsten erwiesen. Insbesondere führt der ‚Prozessstrom‘ Abluft, da dessen Austrittstemperatur aus dem Haustechnikobjekt je nach Nutzungsgrad für jeden typischen Betriebszustand in iterativen Schritten eruiert werden muss, zu einem beträchtlichen Mehraufwand bei der Durchführung der Pinch-Analyse.

Mit der Pinch-Analyse werden auf jeden Fall alle Anlagenverschaltungen resp. Potentiale gefunden - auf Prozess, wie auch auf Infrastrukturebene - die auch konventionell eruiert werden können. Mit einer Zuluft-Abluft-WRG kann beispielsweise mit einer Wärmerückgewinnung von durchschnittlich 100 kW beim Fallbeispiel PSI gerechnet werden. Diese Grössenordnung wird im weiteren auch durch das Gebäudesimulationsprogramm DEO-2 bestätigt. Zudem werden zusätzliche wirtschaftliche Daten und detaillierte Auslegungsgrössen für die Zuluft-Abluft-WRG erhalten. Die Durchführung einer Gebäudesimulation zur Ergänzung der Resultate der Pinch-Analyse ist daher auf jeden Fall sinnvoll.

Zusätzliches WRG-Potential kann mittels der Pinch-Analyse sogar unter Mitberücksichtigung zeitlich ändernder Prozessanforderungen erschlossen werden. Beispiel hierfür ist die zeitliche unterschiedliche Verschaltung der Rückkühlung der Laborgeräte mit den Prozessströmen Zuluft und Abluft mittels zweier Drei-Weg-Ventile, die alleine mit konventionellen Methoden nicht gefunden worden wären.

Die Durchführung Pinch-Methode wird daher vor allem bei komplexeren Haustechnikobjekten (Kat. III, IV oder V nach SIA 381.1) zur Durchführung empfohlen, da hier genügend Potential vorhanden ist und der Aufwand für die Pinch-Analyse im Verhältnis zum erwartenden Ertrag steht.

Als weiteres Vorgehen wird eine Ergänzung der Gebäudesimulation mit Berücksichtigung von internen Lasten wie die Rückkühlung der Laborgeräte und anderen Verbrauchern vorgeschlagen, da dann ein besserer Vergleich oder eine weitergehende Ergänzung mit der Pinch-Methode möglich wäre.

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

Abstract in English

Keywords: batch process / building services optimisation / energy saving / process integration / pinch analysis / optimisation

The pinch method (p.m.) is a well established method to analyse and optimise complex continuous processes. In the last couple of years the p.m. has been further developed to handle batch processes as well. In the Chemical Industry most batch processes can be split up into a number of time slices with quasi continuous process conditions. It is, however, much more difficult to handle discontinuous processes such as heating, cooling and ventilation engineering. The varying outside temperature, the varying extent of use of the building by the staff etc. represent an unlimited number of process demands.

The report describes the possibilities and the boundaries of the pinch method in the field of civil engineering and demonstrates the results of a pilot project: the pinch method applied to a chemical laboratory.

The main problem was to find a compromise between the contradicting demands aiming at reducing the time spent on the analysis and the need to obtain results of sufficient accuracy. Hofstetter proposes to define eight representative sets of conditions, to be analysed by the pinch method in order to develop the optimised network of heat transmitters for each condition. Results thus obtained finally allow to define the optimised network capable of meeting all demands. In the pilot project, this approach - although complicated and time consuming - was successful, with a very efficient network emerging.

The report is available in form of a handbook, describes the method and comments it step by step.

Inhaltsverzeichnis

ZUSAMMENFASSUNG	I
ABSTRACT IN ENGLISH	II
INHALTSVERZEICHNIS.....	III
1 EINLEITUNG	1
2 AUFBAU DES HANDBUCHES	1
3 CHECKLISTE ALS ENTSCHEIDUNGSHILFE	2
4 ALLGEMEINE VORGEHENSWEISE.....	3
4.1 PLANUNGSHIERARCHIE MIT DEM ZWIEBELSCHALENMODELL.....	3
4.2 VORGEHENSKONZEPT BEI DER GESAMTOPTIMIERUNG EINES HAUSTECHNIKOBJEKTS AM FALLBEISPIEL PSI.4	4
4.3 EINFÜHRUNG IN DAS FALLBEISPIEL	6
4.4 VERWENDUNG EINES GEBÄUDESIMULATIONSPROGRAMMES.....	6
5 EXEMPLARISCHE DURCHFÜHRUNG DER PINCH-METHODE AN EINEM HAUSTECHNIKOBJEKT (FALLBEISPIEL PSI).....	8
5.1 PROZESS (1. ZWIEBELSCHALE).....	8
5.1.1 Pflichtenheft (Eingangsgrösse).....	8
5.1.2 Festlegen der Prozessanforderungen.....	8
5.1.3 Abgrenzung der Verbrauchergruppen resp. der Prozessanforderungen.....	8
5.1.3.1 Ist die Abluft eine Prozessanforderung?.....	11
5.1.3.2 Wahl des Temperaturniveaus, vorgängige Wahl möglich?	12
5.1.4 Unterteilung in Einzelzustände durchführen	13
5.1.4 Resultate Zwiebelchale 1.....	15
5.2 PROZESSWÄRMETAUSCHER-NETZWERK (2. ZWIEBELSCHALE)	15
5.2.1 Zielwertfindung mit Verbund und Gesamtkostenkurven	15
5.2.2 Netzwerk Design	16
5.2.3 'Netzwerk-Loop' infolge Soft-Data Abluft.....	17
5.2.4 Zusammenführen der Wärmetauschernetzwerke der verschiedenen Betriebszustände zur Schaltung 'Prozess-Wärmetauscher'.....	20
5.2.5 Vereinfachung der Schaltung 'Prozess-Wärmetauscher'.....	21
5.2.6 Ergänzende wirtschaftliche Beurteilung mittels Gebäudesimulationsprogramm.....	22
5.2.7 Resultate Zwiebelchale 2.....	23
5.3 OPTIMIERUNG WÄRMESPEICHERUNG (3. ZWIEBELSCHALE).....	24
5.4 OPTIMIERUNG DER INFRASTRUKTUR (4. ZWIEBELSCHALE).....	24
5.4.1 Gesamtverbundkurven für jeden Einzelzustand bestimmen	24
5.4.2 Spezifikation der vorhandenen, resp. der zugänglichen Infrastruktur (Utilities)	24
5.4.3 Gesamtverbundkurven mit Infrastruktur ergänzen, Restbedarf bestimmen.....	25
5.4.4 Mit allen Einzelzuständen kompatible Infrastruktur einführen.....	27
5.4.5 Ergänzung der Schaltung Prozess-Wärmetauscher mit Infrastruktureinrichtungen	27
5.4.6 Resultate Zwiebelchale 4.....	28
6. VERALLGEMEINERUNG	30
6.1 VERALLGEMEINERUNG DER ERKENNTNISSE DES FALLBEISPIELS AUF UNTERSCHIEDLICHE HAUSTECHNIKOBJEKTE	30
6.2 ÜBERSICHT UND GRENZEN DER PINCH-METHODE IN DER KOMPLEXEN HAUSTECHNIK.....	31
6.3 GEBÄUDESIMULATION.....	32
7 SYMBOLVERZEICHNIS	33
8 LITERATURVERZEICHNIS	33

1 Einleitung

Die Pinch-Methode (PM) als Systemmethode optimiert durch die gleichzeitige Betrachtung von Technik und Ökonomie Gesamtsysteme. Je komplexer diese Systeme sind, desto unentbehrlicher wird die PM, um überhaupt zu optimalen Ergebnissen zu kommen. Durch den grundsätzlichen Ansatz mit Definition der Prozessanforderungen sind völlig neue Lösungen von bisher konventionellen Anlagen auffindbar. Hingegen ist ihr Nutzen v.a. in der komplexen Haustechnik wie Spitälern, grossen Einkaufs- und Verwaltungszentren sowie Freizeitparks, wo neben der klassischen Simulationsrechnung auch die Strukturoptimierung einen Stellenwert besitzt noch unklar. Das Projekt will durch theoretische und praktische Arbeiten anhand eines konkreten haustechnischen Objekts Einsatzmöglichkeiten der PM aufzeigen. Im Erfolgsfall wird dem Haustechnikingenieur ein Praxisguide mit neuen Vorgehensmethodiken inkl. der Strukturoptimierung beinhaltend u.a. Anlagenschaltungen zur Verfügung gestellt.

Ausgehend von einem bestehendem oder für ein neues Haustechnikobjekt wird in diesem Bericht die Anwendbarkeit der Pinch-Methode untersucht. Dabei wird insbesondere auf die diskontinuierlichen Aspekte (Stichworte: variable Aussentemperatur, unterschiedliche Nutzung, usw.) eingegangen.

2 Aufbau des Handbuches

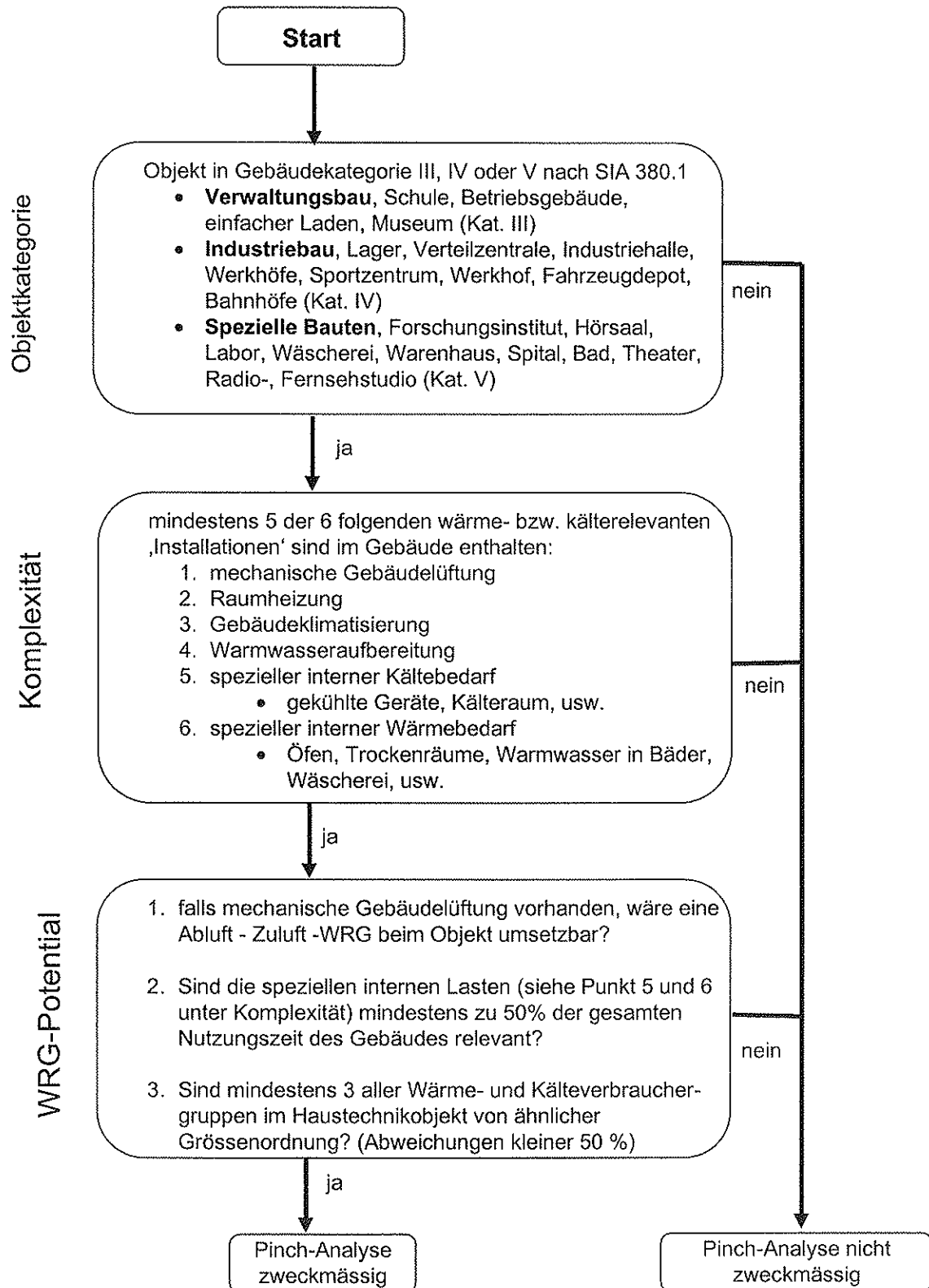
Das Handbuch Pinch-Methode in der Haustechnik soll einem Ingenieur ermöglichen eine Pinch-Analyse an einem bestehenden oder geplanten Haustechnikobjekt selbstständig durchzuführen und dabei u.a. eine optimierte Anlagenschaltung zu finden. Dieses Handbuch soll dazu als „Guide“ dienen und ist wie folgt aufgebaut:

1. Eine Checkliste ermöglicht als erstes, das zu optimierende Objekt auf die Notwendigkeit einer Pinch-Analyse zu untersuchen. (Kap.3)
2. In Kap. 4 ist die allgemeine Vorgehensweise erläutert. Sie gibt dem Leser einen Überblick über den Ablauf der Pinch-Analyse bei einem Haustechnikobjekt. Als erstes wird der grobe Ablauf mit Hilfe des Zwiebelschalenmodells erläutert (Kap. 4.1) und nachfolgend in Kap. 4.2 sind dann die einzelnen Teilschritte der Pinch-Analyse aus dem graphischen Vorgehenskonzept ersichtlich. Zudem erfolgt eine Einführung in das Haustechnikobjekt **Paul-Scherrer-Institut** in Würenlingen (PSI, Kap. 4.3), da dieses in diesem Handbuch als Fallbeispiel genutzt wird. Insbesondere um die wirtschaftliche Umsetzbarkeit, der mit der Pinch-Analyse gefundenen Verschaltung der Prozesswärmetauscher, zu überprüfen, wird eine konventionelle Methode - nämlich das Gebäudesimulationsprogramm DOE-2 - eingesetzt. In Kapitel 4.4 wird die Verwendung dieses Gebäudesimulationsprogrammes in der Pinch-Analyse erläutert.
3. Entsprechend wird in Kapitel 5 an diesem Fallbeispiel die Haustechnik-Pinch-Analyse exemplarisch - Schritt für Schritt - vorgeführt. Dabei wird strikt nach dem graphischen Vorgehenskonzept resp. nach dem Zwiebelschalenmodell (Kap. 4.1) vorgegangen. Die einzelnen Teilschritte sind so allgemein wie möglich beschrieben, so dass eine Durchführung der Pinch-Analyse für ein anderes Haustechnikobjekt in der gleichen Art und Weise erfolgen kann.
4. Zudem wird in Kapitel 6 eine Verallgemeinerung der Erkenntnisse des Fallbeispiels auf unterschiedliche Haustechnikobjekte durchgeführt und die Grenzen der Pinch-Methode im Haustechnikbereich aufgezeichnet.

Es wird davon ausgegangen, dass dem Leser resp. dem Anwender des Handbuches die Prinzipien der Pinch-Methode weitestgehend bekannt sind, anderenfalls ist ein Verständnis dieses Handbuchs nicht möglich. Empfehlenswerte Literatur über die Pinch-Methode ist im allgemeinen [1-3, 4] und für die Pinch-Methode im Batchbereich (zeitlich abhängig) [6]. Um die Verbundkurven, die Gesamtverbundkurven und die Wärmetauschernetzwerke unter Berücksichtigung von geeigneten ökonomischen Daten zu erhalten, ist die Verwendung des Programmes PinchLENI der ETH Lausanne [5] zu empfehlen.

3 Checkliste als Entscheidungshilfe

Die Durchführung der Pinch-Analyse ist zweckmässig, wenn das zu untersuchende Haustechnikobjekt gewisse Anforderungen bezüglich Grösse, Komplexität und WRG-Potential erfüllt. Als Entscheidungshilfe soll die nachfolgende Checkliste dienen:



4 Allgemeine Vorgehensweise

4.1 Planungshierarchie mit dem Zwiebelschalenmodell

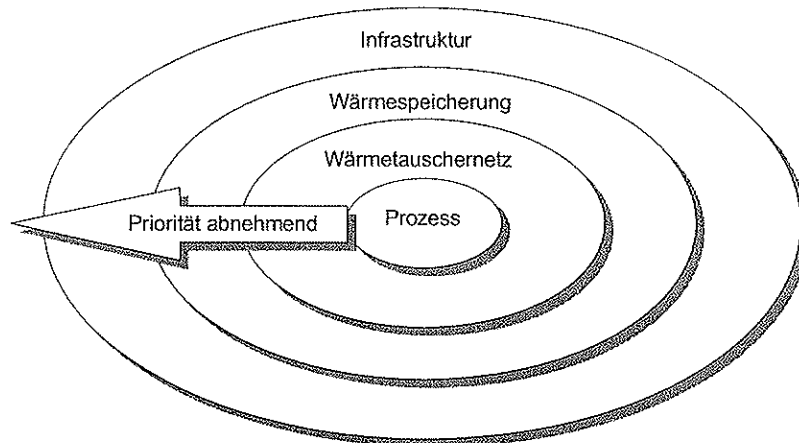


Abbildung 4.1 Zwiebelschalenmodell

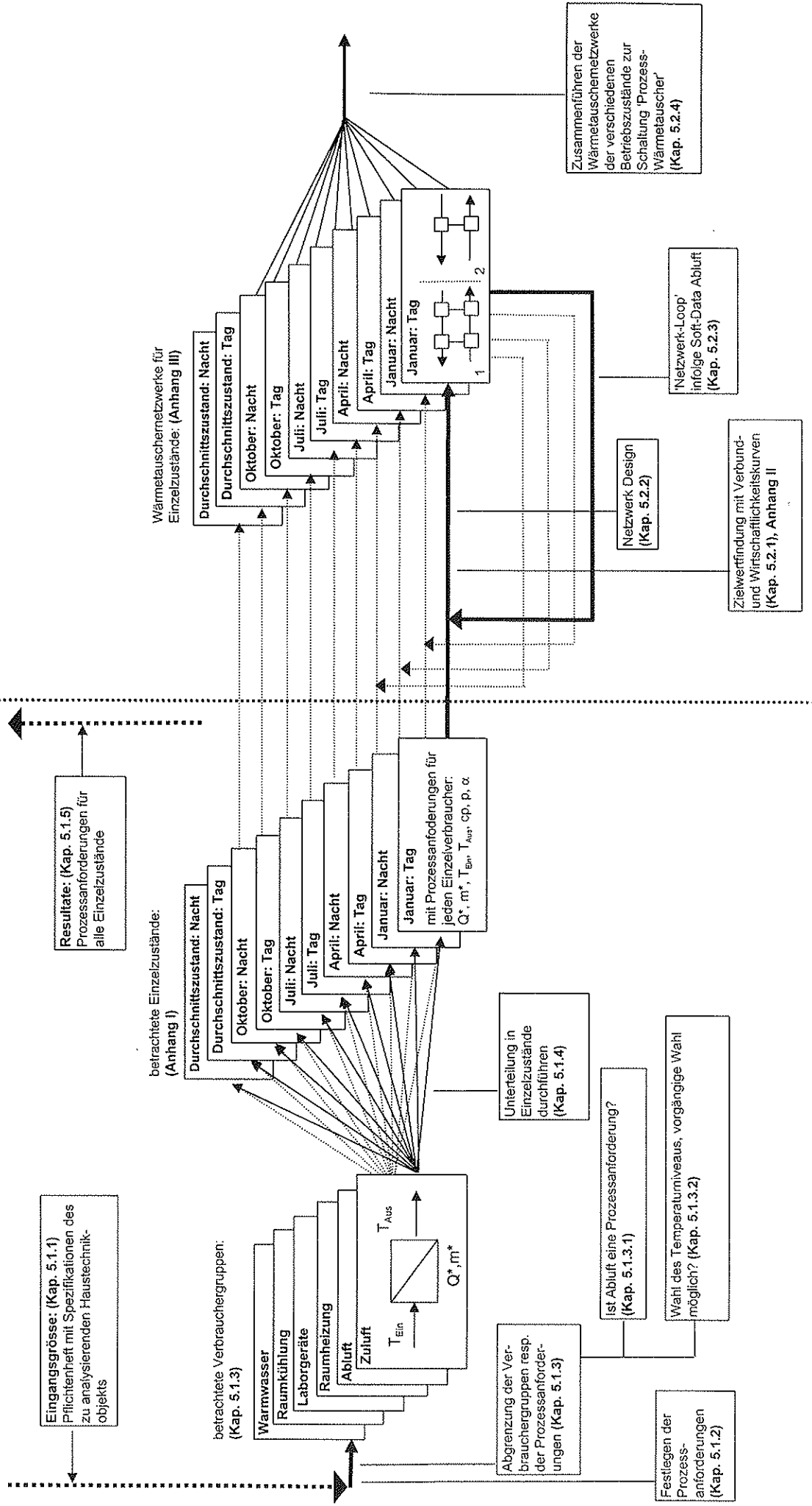
Eine hierarchische Vorgehensweise ist auch bei einem Haustechnikobjekt wesentlich. Dies kann mit dem Zwiebelschalenmodell (Abb. 4.1) veranschaulicht werden.

1. Zuerst werden die eigentlichen Prozesse, die beim Haustechnikobjekt durch die verschiedenen Wärme- und Kälteverbrauchergruppen (verschiedene Kühlgeräte, Warmwasseraufbereitung, Raumheizung,...) repräsentiert sind, definiert und in geeigneter Weise voneinander abgegrenzt (Kap. 5.1).
 2. Anschliessend erfolgt die Auslegung und Optimierung des Prozesswärmetauschernetzes unter Berücksichtigung des diskontinuierlichen Verlaufs des Wärme- und Kälteverbrauchs der einzelnen 'Prozesse' (Kap. 5.2).
 3. Mit der nächsttieferen Priorität wird die Wärmespeicherung untersucht (Kap. 5.3) falls von Belang und
 4. mit letzter Priorität erfolgt die Auslegung des Infrastrukturnetzes (Utilities, Kap. 5.4). Dies sind im Fall des Haustechnikobjekts die Wärme- und Kältelieferanten wie Fernwärme und Flusswasser.
- Eine Optimierung der Infrastrukturelemente ist im allgemeinen weniger wirtschaftlich als Massnahmen die in den inneren Schalen zu Prozessverbesserungen führen. Für das Haustechnikobjekt heisst dies, dass eine Optimierung der Wärme- und Kälteverbrauchergruppen mehr Wirkung auf das gesamte Objekt (Stichwort Investitionen) als auf Stufe Infrastruktur haben.

4.2 Vorgehenskonzept bei der Gesamtoptimierung eines Haustechnikobjekts am Fallbeispiel PSI

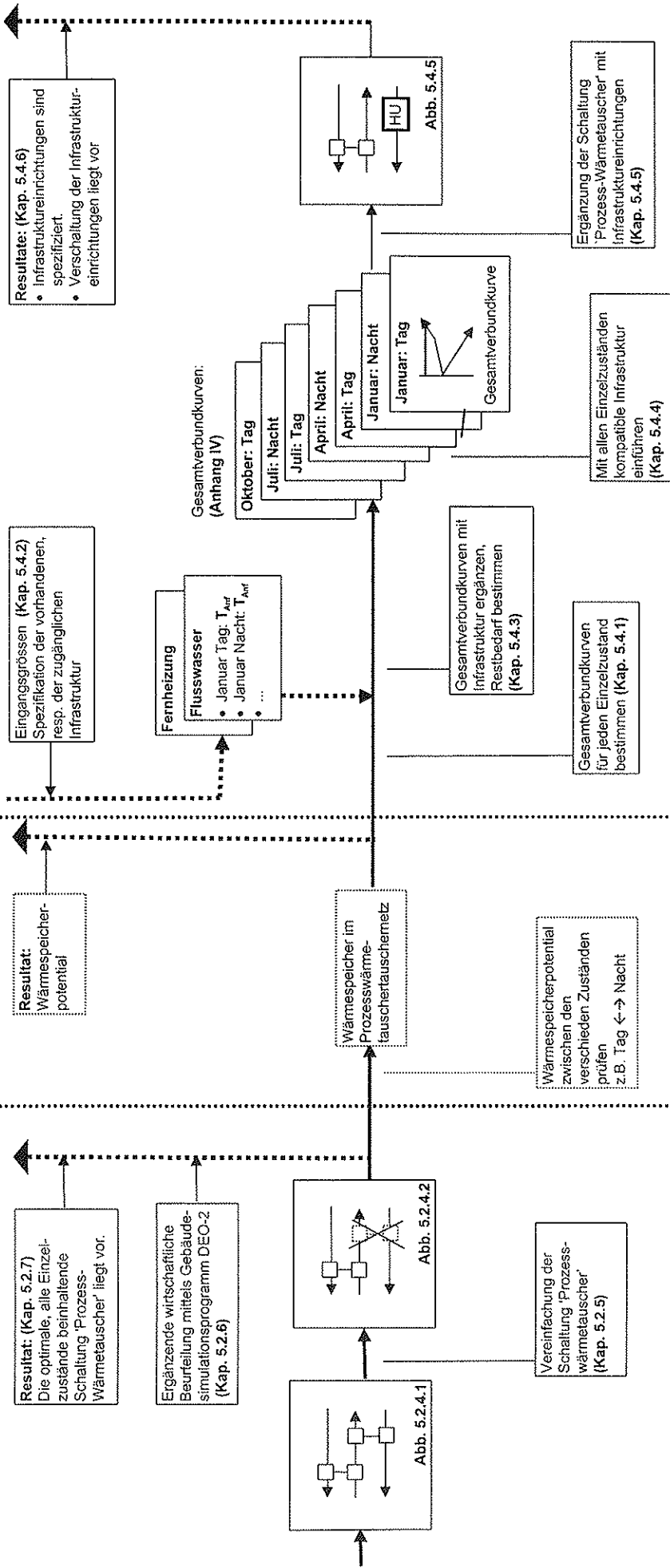
Prozess (1. Zwiebelschale, Kap. 5.1)

Wärmetauschernetzwerk (2. Zwiebelschale, Kap. 5.2)



Wärmespeicher (3. Zwiebelschale, Kap. 5.3)

Optimierung der Infrastruktur (4. Zwiebelschale, Kap. 5.4)



4.3 Einführung in das Fallbeispiel

Da das Plichtenheft eines neu zu erstellenden Laborkomplexes des Paul-Scherrer-Instituts als Fallbeispiel in dieser Wegleitung dient, werden in diesem Kapitel die wichtigsten vor allem thermisch relevanten Spezifikationen dieses Objekts beschrieben.

Allgemeines:

Das Forschungslabor-Gebäude ist ein Gebäudekomplex mit Büros und Labors mit verschiedenen Standards: nämlich 26 Nass-Labors, 34 Trocken-Labors, 21 C-Labors, sowie Büro + Sitzungszimmer, Technik + Messräume, Lager- und allgemeine Räume. Das **Gebäudevolumen** beträgt insgesamt **56'376 m³** mit einer Gebäudebreite von 54 m, -tiefe von 58 m und einer -höhe von 18 m.

Gebäudehülle:

Insbesondere für die Berechnung der **Transmissionverluste** $\dot{Q}_T$ ist die Gebäudehülle von Bedeutung. Die Hüllflächen A_i und die entsprechenden Wärmedurchgangskoeffizienten k_i sind in der nachfolgenden Tabelle 4.3.1 zusammengefasst:

Gebäudehülle:	Fläche A	Wärmedurchgangskoeff. k
Dach	3132 m ²	0.4 W/m ² K
Boden	3132 m ²	0.5 W/m ² K
Fassade	2379 m ²	0.4 W/m ² K
Fenster	1189 m ²	2.6 W/m ² K

Tabelle 4.3.1

Entsprechend lassen sich die Transmissionverluste berechnen:

$$\dot{Q}_T = (T_{\text{Aussenluft}} - T_{\text{Innenluft}}) * \sum_{i=1}^n (k_i * A_i) \quad \text{Gl. 4.3.1}$$

Im Januar ist bei einer minimalen Aussentemperatur von -11°C folglich mit Transmissionsverlusten von rund 200 kW zu rechnen (Innentemperatur 18°C)!

Luftbedarf:

Die maximale **Luftmenge** des gesamten Gebäudes ergibt sich aus dem dominierenden Bedarf der 116 Laborkapellen und beträgt während des Tages maximal **$V^* = 70'000 \text{ m}^3/\text{h}$** und während der Nacht aufgrund geringerer Nutzung rund **$V^* = 10'000 \text{ m}^3/\text{h}$** .

Warmwasserbedarf:

Der **Warmwasserbedarf** lässt sich aus den total 81 Zapfstellen mit einem Verbrauch von 0.35 l/min je Zapfhahn und einem Gleichzeitigkeitsfaktor von 0.16 zu **0.075 kg Warmwasser/s** abschätzen.

Laborgerätekühlung

Um die in den Labors installierten Geräte zu kühlen ist ein Kühlwasserkreislauf mit einer Vorlauftemperatur von **16°C** und einer Rücklauftemperatur von **26°C** vorgesehen. Die maximale Kälteleistung beträgt während des Tages **100 kW** und während der Nacht **20 kW**.

Infrastruktur

Für die Deckung des Wärme- und Kältebedarfs steht einerseits eine **Fernwärmeversorgung**, andererseits das Nahe dem Gebäudestandort vorhandene **Aarewasser** zur Verfügung.

4.4 Verwendung eines Gebäudesimulationsprogrammes

Mittels des Gebäudesimulationsprogrammes DEO-2 mit der bedienerfreundlichen Oberfläche der Konvekta AG kann bei Eingabe der nachfolgend aufgeführten Daten für das spezifizierte Haustechnikobjekt, die für die Lüftung relevanten Energiemengen und wirtschaftlichen Kennzahlen

berechnet werden. Zudem wird auch eine Dimensionierung der Lüftungstechnischen Anlage insbesondere der Abluft-Zuluft – Wärmerückgewinnung (WRG) durchgeführt:

- allgemeinen Daten (meteorologischen Daten, zu berücksichtigende Varianten,...)
- Anlagendefinitionen (Verhältnis Aussenluft zu Fortluft, Raumeinblastemperatur, Luftwechsel pro Raum, minimale und maximale Aussentemperatur in Winter resp. im Sommer,...)
- WRG - Definitionen (Art des WRG-Systems mit entsprechenden Spezifikationen),
- finanziellen Daten (Energiepreise, Zinsfuß, Investitionskosten je kW,...)
- spezifischen Raumdaten (Geometrien, Daten über die Nutzung, vorhandene Geräte und über die einzelnen Raumhüllflächen wie Wände, Böden und Decken)

Bei der Abluft-Zuluft-WRG handelt es sich um einen Wärmetausch zwischen zwei Prozessströmen. Betrachtet man das Zwiebelschalenmodell Abb. 4.1 so ist folglich eine Einbindung der Gebäudesimulation in die Pinch-Analyse in der zweiten Zwiebelschale zur Überprüfung des mit der Pinch-Methode erhaltenen Wärmetauschernetzes am sinnvollsten. Somit ist sichergestellt, dass insbesondere für die Auslegung der beiden äusseren Zwiebelschalen (Wärmespeicherung und Infrastruktur) optimale Voraussetzungen vorhanden sind. In Kapitel 5.2.6 ist daher die Gebäudesimulation für das Fallbeispiel PSI mit den gleichen Eingangsdaten wie für die Pinch-Analyse in den ‚exemplarischen Ablauf‘ eingebaut. [Anhang V] Neben einem Vergleich der mit diesen beiden Methoden erhaltenen WRG-Auslegung sind in diesem Kapitel auch die mit der Gebäudesimulation zusätzlich erhaltenen wirtschaftliche Daten kurz zusammengefasst.

5 Exemplarische Durchführung der Pinch-Methode an einem Haustechnikobjekt (Fallbeispiel PSI)

5.1 Prozess (1. Zwiebelschale)

5.1.1 Pflichtenheft (Eingangsgrösse)

Als Grundlage muss ein Pflichtenheft vorliegen, in welchem das zu analysierende Haustechnikobjekt detailliert beschrieben wird. Je mehr Daten spezifiziert sind, desto genauer kann eine Pinch-Analyse erfolgen. Notwendige Grundlagen sind insofern für eine Pinch-Analyse notwendig, wenn sie den Wärmeverbrauch oder Kälteverbrauch des Haustechnikobjekts in irgend einer Weise beeinflussen. Dies sind im allgemeinen:

- Spezifikation des Gebäudetyps (Hotel, Verwaltungsbau, Schule, Spital, Einkaufszentrum oder Hallenbad)
- Baulicher Zustand oder geplante bauliche Ausführung (Aufbau der Isolation um z.B. Transmissionverluste der Gebäudehülle abschätzen zu können)
- Daten über die Medienschliessung (z.B. Warmwasser, Heisswasser und Kühlwasser)
- Haustechnikgrundlagendaten (Anforderungen an Haustechnik, Gleichzeitigkeiten für Lüftung, Klima, Kälte)
- Nutzungskonzept (Raumnutzung, Raumprogramm)
- Infrastrukturbedürfnisse (Einrichtungen mit Kühlwassererfordernissen)
- Klimadaten für den Objektstandort

5.1.2 Festlegen der Prozessanforderungen

Aufgrund des Pflichtenheftes müssen die verschiedenen Einzelverbraucher im Haustechnik-Objekt **identifiziert** und zu Wärme- und Kälteverbrauchergruppen zusammengefasst werden. Beispielsweise werden die verschiedenen Kühlgeräte durch Bildung der Verbrauchergruppe Kühlgerätebedarf oder die verschiedenen Konvektoren durch Bildung der Gruppe Raumheizeinrichtungen in die Pinch-Analyse miteinbezogen.

Fallbeispiel PSI : Verbrauchergruppen

- Zuluft (Wärmeverbraucher falls Aussentemperatur kleiner als Raumtemperatur resp. Kälteverbraucher falls Aussentemperatur grösser als Raumtemperatur)
- Abluft (Wärme- oder Kälteverbraucher je nach Zuluft, resp. genau umgekehrt, da Nutzung in WRG)
- Wärmebedarf der Raumheizeinrichtungen (Konvektoren, Bodenheizungen)
- Laborgeräterückkühlbedarf
- Bedarf der Raumkühlung (Umluftkühlgeräte, Kältedecke)
- Warmwasseraufbereitung

5.1.3 Abgrenzung der Verbrauchergruppen resp. der Prozessanforderungen

Um die **Verbrauchergruppen** unabhängig voneinander betrachten resp. auslegen zu können, müssen diese Verbraucher voneinander **entkoppelt resp. abgegrenzt** werden und zwar derart, dass für jeden abzukühlenden und aufzuwärmenden Strom in einem zweiten Schritt (Kap. 5.1.4) die Prozessanforderungen

- Anfangstemperatur: T_{Anf}
- Endtemperatur T_{End}
- Massenstrom $\dot{m}^*$
- Wärmestrom $\dot{Q}^*$
- Wärmekapazität c_p und Druck p

definiert werden können und zwar unabhängig voneinander.

Dazu müssen teilweise Vereinfachungen getroffen werden, um eine Abgrenzung erst zu ermöglichen. Beispiel hierfür ist die Kopplung: Lüftung - Raumheizung - elektrische Wärmequellen und Transmissionverluste durch die Gebäudehülle. Denn sowohl die Raumheizung wie auch der

Lufterhitzer im Zuluftstrom dienen im allgemeinen der Gebäudeheizung und zwar dem Ausgleich des Energieverlusts: Transmission abzüglich der internen Wärmelasten. In diesem Fall wäre eine Entkoppelung der Lüftung von der Raumheizung für die Durchführung der Pinch-Analyse sinnvoll, indem man der Lüftung keine Raumheizzwecke zuordnet. Sie hat nur die Aussenluft auf Raumtemperatur zu erwärmen. Bei der Ausführung des Objekts muss man sich bewusst sein, dass diese für die Berechnung geforderte Unabhängigkeit der einzelnen Verbrauchergruppen die grundsätzliche Einschränkung bei der Anwendung der Pinch-Analyse darstellt. D.h. wenn diese Entkopplungen nicht umgesetzt werden können, so stimmen die Berechnungen nicht mehr mit dem Haustechnikobjekt überein. [Anhang I]

Die einzelnen Prozessströme sind dann entkoppelt, wenn es jeweils gelingt, die folgenden drei Prozessdaten unabhängig voneinander zu spezifizieren

- **Anfangstemperatur** T_{Anf} die
- **Endtemperatur** T_{End} und den
- **Massenstrom** m^* oder **Wärmestrom** Q^*

Die übrigen Prozessdaten sind abhängig vom Prozessmedium und Prozessdruck nicht aber von der Art der Abgrenzung.

Fallbeispiel PSI:

Zuluft (Abb. 5.1.3.1)

- Abgrenzung: Zuluft tritt mit der jeweiligen Raumtemperatur in den Raum ein, dient daher nicht der Raumkühlung oder -heizung, sondern nur der Belüftung des Gebäudes.
- Prozessanforderungen: Die Prozessanforderung für den abzukühlenden resp. aufzuwärmenden Strom (je nach Aussentemp.) sind für die Anfangstemperatur (T_{Anf}) die Aussenlufttemperatur und für die Endtemperatur (T_{End}) die Zulufttemperatur. Der Massenstrom m^* ist durch den spezifizierten Luftbedarf der Laborkapellen gegeben.

abzukühlender oder aufzuwärmender Zuluftstrom

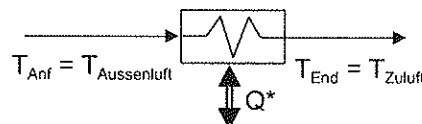


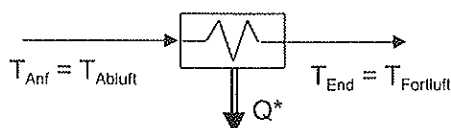
Abb. 5.1.3.1 Prozessstrom Zuluft

- weitere Spezifikationen:
 - Festlegung der massgebende Aussentemperatur $T_{\text{Aussenluft}}$ nach SIA V 382/2
 - Die Wärmekapazität der Zuluft wird als konstant betrachtet: $c_p = 1 \text{ [kJ/kgK]}$
 - Raumtemperatur ($= T_{\text{Zuluft}}$) liegt je nach Jahres- und Tageszeit zwischen 18°C und 22°C .

Abluft (Abb. 5.1.3.2)

- Abgrenzung: Gebäudehülle des PSI ist geschlossen (Zuluftmassenstrom = Abluftmassenstrom)
- Prozessanforderungen: Der Abluftstrom wird ebenfalls analog der Zuluft als Prozessstrom betrachtet. (Begründung siehe Kap. 5.1.2.1). Je nachdem ob die Zuluft abgekühlt (WRG) resp. aufgewärmt (adiabate Fortluftkühlung) werden muss, wird die Abluft zu einem abzukühlenden resp. zu einem aufzuwärmenden Strom. Die beiden Fälle ergeben eine unterschiedliche Abgrenzung, da die Abluft im Fall des aufzuwärmenden Stroms zwecks Erreichen höherer Wärmetauscherleistung durch einen Nasswäscher vorgekühlt wird.

abzukühlender Abluftstrom: $T_{\text{Anf}} > T_{\text{End}}$



aufzuwärmender Abluftstrom: $T_{\text{Anf}} < T_{\text{End}}$

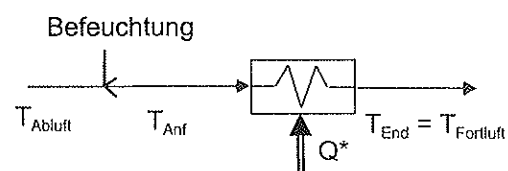


Abb. 5.1.3.2 Prozessstrom Abluft

Entsprechend ergeben sich die drei Prozessanforderungen: Anfangstemperatur T_{Anf} , Endtemperatur T_{End} und der Massenstrom m^* der Abluft (= Massenstrom Zuluft).

- weitere Spezifikationen:
 - Festlegung der massgebende Aussentemperatur $T_{\text{Aussenluft}}$ nach SIA V 382/2
 - Die Wärmekapazität der Abluft wird als konstant betrachtet: $c_p = 1 \text{ kJ/kgK}$
 - Raumtemperatur ($=T_{\text{Zuluft}}$) liegt je nach Jahres- und Tageszeit zwischen 18°C und 22°C .

Raumheizung mittels Konvektoren oder Bodenheizung (Abb. 5.1.3.3)

- Abgrenzung: Transmissionverluste durch Gebäudehülle werden zu 100% der Raumheizung angelastet. Der Wärmeeintrag durch elektrischen Strom in das Gebäude reduziert den Raumheizungsbedarf um 25 %
- Prozessanforderungen: Das für die Raumheizung benötigte Warmwasser muss nach Wärmeabgabe in den Konvektoren resp. Bodenheizung 'rüberwärmt' werden. Die Rücklauftemperatur $T_{\text{Rücklauf}}$ wird folglich zur Anfangstemperatur T_{Anf} und die Vorlauftemperatur T_{Vorlauf} zur Endtemperatur T_{End} des Prozessstromes. Der notwendige Wärmeleistung Q^* berechnet sich aus den Transmissionverlusten.

aufzuwärmender Warmwasserstrom: $T_{\text{Anf}} < T_{\text{End}}$

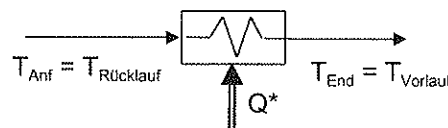


Abb. 5.1.3.3 Prozessstrom für Raumheizung

Als Raumheizungseinrichtungen werden die beiden Varianten Konvektorheizung und Bodenheizung betrachtet. Da die Bodenheizung eine grössere Oberfläche als die Konvektoren aufweist, kann das Temperaturniveau des Warmwassers, um den gleichen Wärmestrom zu erreichen, tiefer gewählt werden. Dieser Einfluss wird in Kap. 5.2.1.2 ausführlich diskutiert.

- weitere Spezifikationen:
 - Heizgradtage und Heiztage von Zürich 20/12 nach SIA 381/3
 - Raumheizungsbedarf während der Nacht entspricht 50 % des Raumheizungsbedarfs während des Tages.

Laborgeräterückkühlbedarf (Abb. 5.1.3.4)

- Abgrenzung: Der Laborgeräterückkühlbedarf ist durch das Pflichtenheft spezifiziert, eine Abgrenzung gegenüber einem anderen Wärmestrom ist nicht notwendig.
- Prozessanforderungen: Die Kühlung der Laborgeräte erfolgt mit Wasser. Dieses wird über eine Rückkühlung mit der Kälteleistung Q^* von der Rücklauftemperatur ($=T_{\text{Anf}}$) wieder auf die Vorlauftemperatur ($=T_{\text{Vor}}$) gekühlt.

abzukühlender Kälteträger: $T_{\text{Anf}} > T_{\text{End}}$

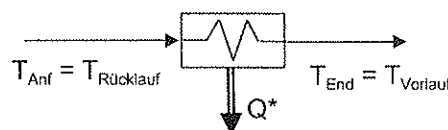


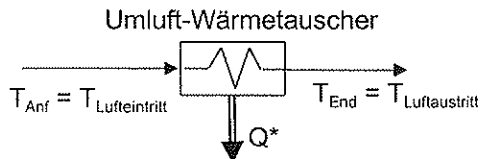
Abb. 5.1.3.4 Prozessstrom der Laborgeräterückkühlung

- weitere Spezifikationen (nach Pflichtenheft)
 - Kälteleistung Tag: 100 kW, Nacht: 20 kW
 - Rücklauftemperatur ($=T_{\text{Anf}}$) = 26°C , Vorlauftemperatur ($=T_{\text{End}}$) = 16°C

Raumkühlung mittels Umluftkühlgeräten oder Kältedecke (Abb. 5.1.3.5)

- **Abgrenzung:** Eine Kühlung erfolgt in den Räumen mit grosser Wärmeentwicklung (infolge elektrischer Geräte, Sonneneinstrahlung, starker Nutzung usw.)
- **Prozessanforderungen:** Als Raumkühleinrichtungen werden die beiden Varianten Umluftkühlgeräte und Kältedecke betrachtet. Die Kältedecke weist eine grössere Oberfläche als die Umluftkühlgeräte auf, somit kann das Temperaturniveau des Kühlmediums - um den gleichen Wärmestrom zu erreichen - höher gewählt werden. Dieser Einfluss wird in Kap. 4.2.1.2 ausführlich diskutiert. Die Prozessanforderungen ergeben sich für die beiden Fälle wie folgt:

Umluftgeräte: abzukühlender Luftstrom



Kältedecke: abzukühlender Kaltwasserstrom

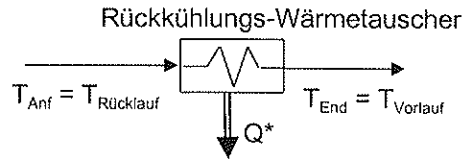


Abb. 5.1.3.5 Prozessstrom der Raumkühlung

Bei den Umluftgeräten ist der betrachtete Prozessstrom Luft. Die Lufteintrittstemperatur entspricht der Anfangstemp (T_{Anf}) und die Luftaustrittstemperatur der Endtemperatur (T_{End}) des zu kühlenden Stromes. Bei der Kältedecke hingegen wird nicht die Luft als Prozessstrom betrachtet, sondern das in der Kältedecke zirkulierende Prozessmedium Wasser, welches im Rückkühler von der Rücklauf temp. ($=T_{Anf}$) auf die Vorlauf temp. (T_{End}) gekühlt wird.

- **weitere Spezifikationen**
 - Kühlung nur im Sommer (Juli) notwendig
 - notwendige Kühlleistung: Tag: 100 kW (80 kW Strom + 20 kW sonstiges, z.B. Sonneneinstrahlung), Nacht: 20 kW
 - zwei Varianten: Umluftkühlgeräte und Kältedecke (Kap. 5.2.1.2)
 - Wärmebedarf für die Erzeugung von Warmwasser

Warmwasseraufbereitung (Abb. 5.1.3.6)

- **Abgrenzung:** Warmwasserbedarf ist im Pflichtenheft spezifiziert, keine Abgrenzung notwendig
- **Prozessanforderungen:** Der Leitungswasser-Strom m^* muss von der entsprechenden Leitungstemperatur (T_{Anf}) auf die Warmwassertemperatur (T_{End}) erwärmt werden.

Aufzuwärmender Leitungswasser-Strom: $T_{Anf} > T_{End}$

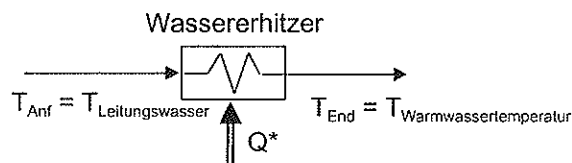


Abb. 5.1.3.6 Prozessstrom der Warmwasseraufbereitung

- **Spezifikationen:**
 - Warmwassertemperatur $T_{Anf}=60^{\circ}\text{C}$
 - notwendiger Massenstrom $m^*=0.075 \text{ kg/s}$ nach Pflichtenheft

5.1.3.1 Ist die Abluft eine Prozessanforderung?

Beim Aufstellen der Prozessanforderungen stellt sich unweigerlich die Frage, ob die Abluft eine Prozessanforderung darstellt. Prozesstechnisch ist es nur notwendig, die Abluft aus dem Gebäude zu bringen. Eine Temperaturänderung des Abluftstromes beim Austritt aus dem Gebäude ist damit aber nicht erforderlich. Berücksichtigt man folglich die Abluft als Prozessanforderung nicht, so geht ein allfälliges Wärmerückgewinnungs-Potential zwischen Zuluft-Abluft oder einem anderen Prozessstrom

schon im Vorhinein verloren! Will man dieses Potential nicht vernachlässigen, so muss die Abluft als Prozessanforderung mitberücksichtigt werden. Dies ist auf zwei verschiedene Arten möglich:

1. Abluft wird als eigenständige Prozessanforderung mitberücksichtigt. Das heisst, man betrachtet sowohl den Zuluftstrom wie auch den Abluftstrom als zwei separate Ströme. Beim Abluftstrom sind hierbei zwei Fälle zu unterscheiden:
 - Abluftstrom wird genutzt um einen anderen Prozessstrom zu kühlen (z.B. Zuluft im Sommer). Folglich ist man an einer möglichst tiefen Anfangstemperatur der Abluft interessiert, was durch zusätzliche adiabate Befeuchtung der Innenluft erreicht wird.
 - Abluftstrom wird genutzt um einen anderen Prozessstrom zu erwärmen (z.B. Zuluft im Winter). Folglich ist man an einer möglichst hohen Anfangstemperatur der Abluft interessiert. In diesem Fall ist die direkte Verwendung der Innenluft ohne Temperaturänderung sinnvoll.

Da die Austrittstemperatur resp. die Fortlufttemperatur im Vorhinein nicht festgelegt werden kann (keine Spezifikation möglich) muss diese in iterativen Schritten resp. durch sogenannte Loops (vgl. Kap. 4.2.3) gefunden werden.
2. Es wird eine Abluft-Zuluft WRG mit maximaler Wärmerückgewinnung auf jeden Fall vorausgesetzt. Folglich muss nur der resultierende Wärme- oder Kältebedarf Q^*_{res} als Prozessanforderung in der Pinch-Analyse betrachtet werden. (vgl. Abb. 5.1.3.1)

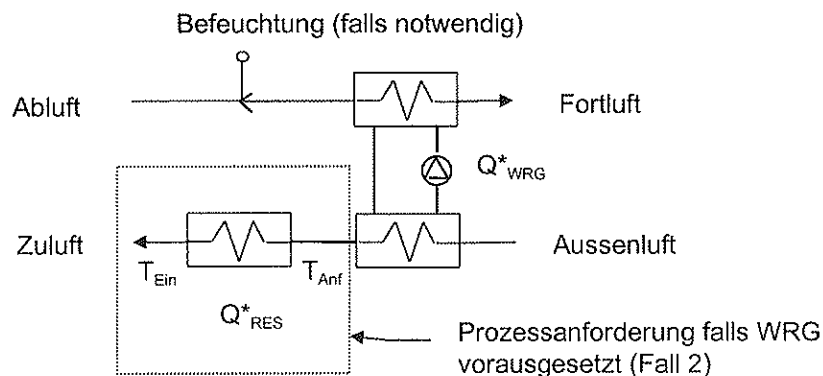


Abbildung 5.1.3.1 Abluft - Zuluft Wärmerückgewinnung

Die erste Variante hat den Nachteil, dass für die Festlegung der Fortlufttemperatur jeweils mehrere iterative Schritte notwendig sind. Dafür legt man sich nicht wie bei der zweiten Möglichkeit schon in diesem 'frühen Stadium' bezüglich einer Wärmetauscherverschaltung fest.

Da die zweite Variante zu einer anderen Schaltung: 'Prozess-Wärmetauscher' mit geringerem Gesamt-WRG führt (vgl. Anhang V) ist zu empfehlen, die Abluft immer als eigenständige Prozessanforderung zu betrachten. In diesem Handbuch wird daher nur die erste Variante dokumentiert.

5.1.3.2 Wahl des Temperaturniveaus, vorgängige Wahl möglich?

Insbesondere bei der Auswahl der Raumheiz- und Raumkühlungseinrichtung hat man die Wahl zwischen Wärmetauscher mit kleiner Oberfläche (Konvektoren, Umluftgerät) oder mit grosser Oberfläche (Bodenheizung, Kälteplatte). Sieht man von Komfortansprüchen ab, so macht die Wahl eines grösseren resp. teureren Wärmetauschers nur Sinn, wenn dafür das Temperaturniveau des Prozessmediums abgesenkt werden kann und damit

1. zusätzliche WRG-Potentiale oder
2. Energieeinsparungen auf der Infrastrukturebene

erschlossen werden können, die kostenmässig in der gleichen Grössenordnung liegen. Das Durchrechnen dieser beiden Varianten beim Fallbeispiel hat gezeigt, dass aufgrund grösserer Oberfläche kein zusätzliches WRG-Potential erschlossen werden kann, aber exergetische Einsparungen auf der Infrastrukturebene möglich sind, wenn eine zweckmässige Anpassung der Infrastruktur an das Temperaturniveau möglich ist:

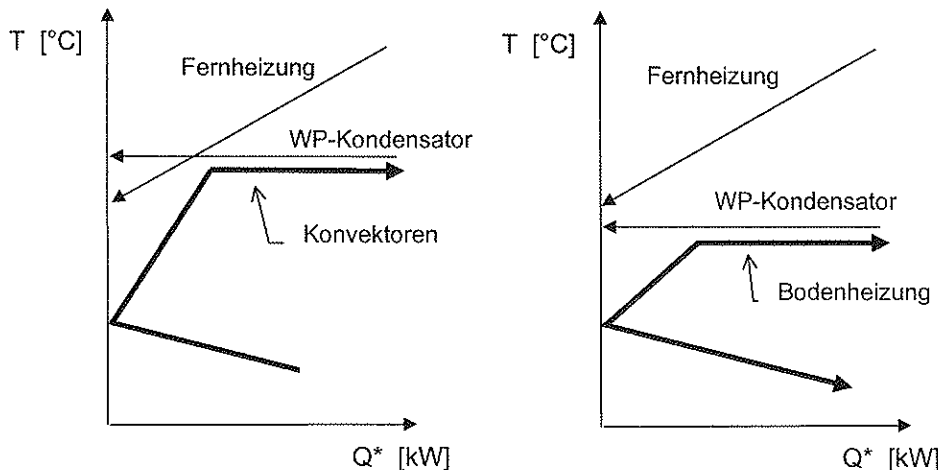


Abbildung 5.1.3.2 Gesamtamtverbundkurven mit unterschiedlichem Temperaturniveau der Raumheizung

Aus Abbildung 5.1.3.2 ist als Beispiel ersichtlich, dass z.B. der Einsatz einer Bodenheizung statt Konvektoren zweckmässig ist, wenn der Infrastrukturbedarf durch eine Wärmepumpe abgedeckt wird, deren Temperaturniveau entsprechend angepasst werden kann. Einsparungen sind dann wärmepumpenseitig möglich, da kleinere Kompressorleistungen anfallen. Steht im Gegensatz dazu nur eine Fernheizung mit unveränderlich Bezugstemperatur zur Verfügung, so werden die auf Prozessebene erreichten Exergieeinsparungen nur zur Infrastrukturebene hin verschoben. Kosten- resp. Energieeinsparungen sind keine möglich.

Möchte man bei der Abgrenzung der Einzelverbraucher für einzelne Verbraucher verschiedene Varianten berücksichtigen, so ist es sinnvoll, wenn man eine Vorabschätzung durchführt, ob die Wahl einer grösseren Oberfläche (Einsatz Bodenheizung, resp. Kühldecke) auch auf der Infrastrukturebene zweckmässig ist. Denn es ist meist schon zu diesem Zeitpunkt abschätzbar, welche Infrastrukturen verfügbar sind, beziehungsweise zum Einsatz kommen werden.

Fallbeispiel PSI:

Da beim PSI als Infrastruktur Flusswasser (Kühlenergie) und Fernheizung (Heizenergie) zur Verfügung stehen und folglich der grösste Bedarf voraussichtlich durch diese Quellen - mit unveränderlichem Temperaturniveau - gedeckt wird, bringt der Einsatz einer Kälte- resp. Bodenheizung keine exergetischen Vorteile. Folglich sind in dieser Wegleitung für die Raumheizung nur die Variante Konvektoren und für die Raumkühlung nur die Variante Umluftgeräte dokumentiert.

5.1.4 Unterteilung in Einzelzustände durchführen

Die einzelnen unter Kapitel 5.1.2 spezifizierten Prozessanforderungen weisen alle eine zeitliche Abhängigkeit auf, die durch variable Aussentemperatur, variierender Nutzungsgrad oder andere Effekte hervorgerufen werden. Es muss nun eine geeignete Einteilung in signifikante Einzelzustände durchgeführt werden, welche die verschiedenen während des Jahres auftretenden 'Betriebsfälle' des Haustechnikobjekts repräsentieren.

Eine mögliche Einteilung könnte aufgrund der ausgeprägtesten Schwankungen wie folgt erfolgen:

1. jahreszeitliche Schwankung (Hauptverursacher: Aussentemperatur)
→ Unterteilung: Januar, April, Juli, Oktober (×4 Zustände)
2. wöchentliche Schwankungen (Hauptverursacher: Nutzungsgrad)
→ Unterteilung: Wochentag/-ende (×2 Zustände)
3. tägliche Schwankungen (Hauptverursacher: Nutzungsgrad (Warmwasser), Aussentemperatur)
→ Unterteilung: Tag, Nacht (×2 Zustände)

4. stündliche Schwankungen (Hauptverursacher: einzelne Verbraucher)

→ Unterteilung: Morgen, Mittag, Abend

(×3 Zustände)

Je nachdem ob man alle 4 Unterteilungsmöglichkeiten berücksichtigt (→ $4 \times 2 \times 2 \times 3 = 48$ Zustände) oder ob man nur zwei Unterteilungen vornimmt Nr. 1 und Nr. 2 (→ $4 \times 2 = 8$ Zustände) ist der nachfolgende Aufwand für die Datenzuordnung und Auswertung entsprechend. Eine vernünftige Einteilung muss nach Gewichten der folgenden Kriterien erfolgen:

- Verfügbarkeit der Daten (Es macht keinen Sinn eine feine Unterteilung vorzunehmen, wenn die zugrundeliegenden Verläufe nur ungenau abgeschätzt werden können)
- Einfluss der einzelnen Schwankungen auf Gesamtwärme- und Gesamtkälteverbrauch (einzelne Verbraucher müssen eventuell bei der Unterteilung nicht berücksichtigt werden, da ihr Verbrauch im Vergleich zum Gesamtverbrauch nicht ins Gewicht fällt)
- Erwünschter Detaillierungsgrad und damit verbundener Auswertungsaufwand (Kosten!)
- Grösse und Komplexität des Haustechnikobjekts bez. Wärme- und Kälteverbrauch (je grösser desto lohnender wird eine genauere Unterteilung)
- vorhandene Erfahrungswerte ähnlicher Objekte

Wie aus diesen Kriterien hervorgeht, ist eine Einteilung vor allem auch mit dem Blick nach vorne verbunden und kann meist - vor allem bei einem grossen, nicht leicht überschaubaren Haustechnikobjekt - nur durch einen iterativen Prozess gewonnen werden. Da bei diesen Zuständen immer von maximalen Wärme- und Kälteverbrauch gemäss Plichtenheft ausgegangen wird, ist eine Einführung von einzelnen Durchschnittszustände sinnvoll, da dies in einem späteren Schritt die Überprüfung der erhaltenen Schaltung 'Prozess-Wärmetauscher' erlaubt.

Fallbeispiel PSI:

Beim PSI erweist sich eine Unterteilung in 8 Einzelzustände (Einteilung nach Nr. 1 und Nr. 3) am sinnvollsten. Damit können sowohl die jahreszeitlichen Schwankungen (Hauptinflussfaktor Aussentemperatur) aber auch die täglichen Schwankungen (Hauptinflussfaktor Nutzungsgrad) mitberücksichtigt werden. Für den Einzelzustand Januar Tag sind die angepassten Prozessbedingungen aus Tabelle 5.1.4.1 ersichtlich, die Gesamtübersicht der Zustände ist in Anhang I beigelegt.

Januar: Tag	T _{Anf} [°C]	T _{End} [°C]	m [*] [kg/s]	c _p [kJ/(kgK)]	p [bar]	α [W/m ² K]	Q [kW]	Stream
Zuluft	-3	20	23.1	1	1	300	531.3	Cold
Abluft	20	?	23.1	1	1	300	?	Hot (?)
Konvektoren	34.9	35	192	4.182	1	10000	80.2	Cold
Laborgeräte	26	16	2.3912	4.182	1	2000	100	Hot
Umluftgeräte	-	-	0	-	-	-	0	-
Warmwasser	11	60	0.075	4.182	1	2000	15.4	Cold

Tabelle 5.1.4.1

Entsprechend für den Einzelzustand Juli: Tag [Anhang I]

Juli: Tag	T _{Anf} [°C]	T _{End} [°C]	m [*] [kg/s]	c _p [kJ/(kgK)]	p [bar]	α [W/m ² K]	Q [kW]	Stream
Zuluft	30	24	23.1	1	1	300	138.6	Hot
Abluft	20	?	23.1	1	1	300	?	Cold (?)
Konvektoren	-	-	0	-	-	-	0	-
Laborgeräte	26	16	2.3912	4.182	1	2000	100	Hot
Umluftgeräte	25	23	50	1	1	300	100	Hot
Warmwasser	16	60	0.075	4.182	1	2000	13.8	Cold

Tabelle 5.1.4.2

Die Abluftendtemperaturen und ihre Wärmeströme sind nicht bekannt, da sie durch Iteration bestimmt werden muss (→ Kap. 5.2.3). Für die Überprüfung der zu erreichenden Verschaltung werden zwei Durchschnittszustände definiert:

- Durchschnittszustand Tag mit einer mittleren Aussentemperatur von 14°C und einem gemittelten Gesamtenergieverbrauch von 60% der vier Einzelzustände Januar, April, Juli und Oktober Tag
- Durchschnittszustand Nacht mit einer mittleren Aussentemperatur von 7°C und einem gemittelten Gesamtenergieverbrauch von 60% der vier Einzelzustände Januar, April, Juli und Oktober Nacht.
(Anhang I)

5.1.4 Resultate Zwiebelschale 1

Als Resultat der Zwiebelschale 1 liegen die Prozessanforderungen für jeden Einzelwärme- und Einzelkälteverbraucher für alle definierten Betriebszustände (Einzelzustände und Durchschnittszustände) vor. Dabei ist die Abluft als eigenständige Prozessanforderung mitberücksichtigt (Kap. 5.1.3.1) und die verschiedenen 'Einzelverbrauchervarianten' sind bezüglich der gewählten Wärmetauscherfläche optimiert. (Kap. 5.1.3.2)

5.2 Prozesswärmetauscher-Netzwerk (2. Zwiebelschale)

5.2.1 Zielwertfindung mit Verbund und Gesamtkostenkurven

Für jeden einzelnen dieser Betriebszustände muss jetzt jeweils das optimale Einzelwärmetauschernetzwerke gefunden werden. Optimal heisst, dass gleichzeitig sowohl Kostenziele aber auch Energieziele erfüllt werden sollen. Diese 'Zielwertfindung' wird mit dem sogenannten **Separate Design** [6] durchgeführt, d.h. die einzelnen Betriebszustände werden vorerst unabhängig voneinander betrachtet. Dabei sind die wirtschaftlichen Grundlagendaten auf denen die Optimierung basiert einheitlich zu wählen:

Investitionskosten:

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

$$K = Cr \cdot (A/100)^{0.71} \cdot ra \cdot ff \quad \text{Gl. 5.2.1}$$

- K = Kosten für den Wärmeübertrager in [Fr.]
- A = Wärmeübertragungsfläche [m²]
- Cr = Modellfaktor [Fr.] (=21000*1.3 Fr.) → korrigiert durch Helbling
- ra = Aktualitätsfaktor (=906/800)
- ff = Faktor Transport und Installation (=3)

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

Betriebskosten:

- Energiekosten inkl. Amortisation
- Heizenergie: 0.04 Fr./kWh_{th}, Kühlenergie: 0.03 Fr./kWh_{th}
- Jahresbetriebszeit (7'000 h/a)

Als erstes müssen daher die Gesamtkostenkurven, die sich aus obigen Investitions- und Betriebskosten zusammensetzen und addiert die jährlichen Gesamtkosten ergeben, berechnet werden. Diese Kurven werden über die minimale Temperaturdifferenz des Energiesystems ($\Delta T_{\min}$) aufgetragen und zeigen die optimale minimale Temperaturdifferenz auf.

Fallbeispiel PSI: Gesamtkostenkurve

Rechte Seite der Abb. 5.2.1 entspricht der Gesamtkostenkurve des Zustandes Januar Tag. Das optimale $\Delta T_{\min}$ (=2.6°C) liegt beim Minimum der Gesamtkostenkurve (=99.19 kFr/y). Alle übrigen Gesamtkostenkurven sind in Anhang II beigelegt

Folglich können aufgrund der Kenntnis des optimalen $\Delta T_{\min}$ des jeweiligen Einzelzustandes die Verbundkurven, mit dem abzukühlenden und aufzuwärmenden Prozessstrom, aufgebaut werden (linke

Seite der Abb. 5.2.1). Daraus ersichtlich sind dann die Pinch-Temperatur, das maximale WRG-Potential, sowie der minimalen Wärme- und Kältebedarf. Zudem bilden diese Kurven die Grundlage für das anschließende Netzwerk-Design.

Fallbeispiel PSI: Verbundkurven

Rechte Seite der Abb. 5.2.1 entspricht den Verbundkurven des Zustandes Januar Tag. Ersichtlich ist eine Pinch-Temperatur von $T=18.70^{\circ}\text{C}$, ein maximales WRG-Potential von 533kW, sowie eine minimaler Wärme- und Kältebedarf von 93.6kW resp. 37.97kW. Alle übrigen Verbundkurven sind in Anhang II beigelegt.

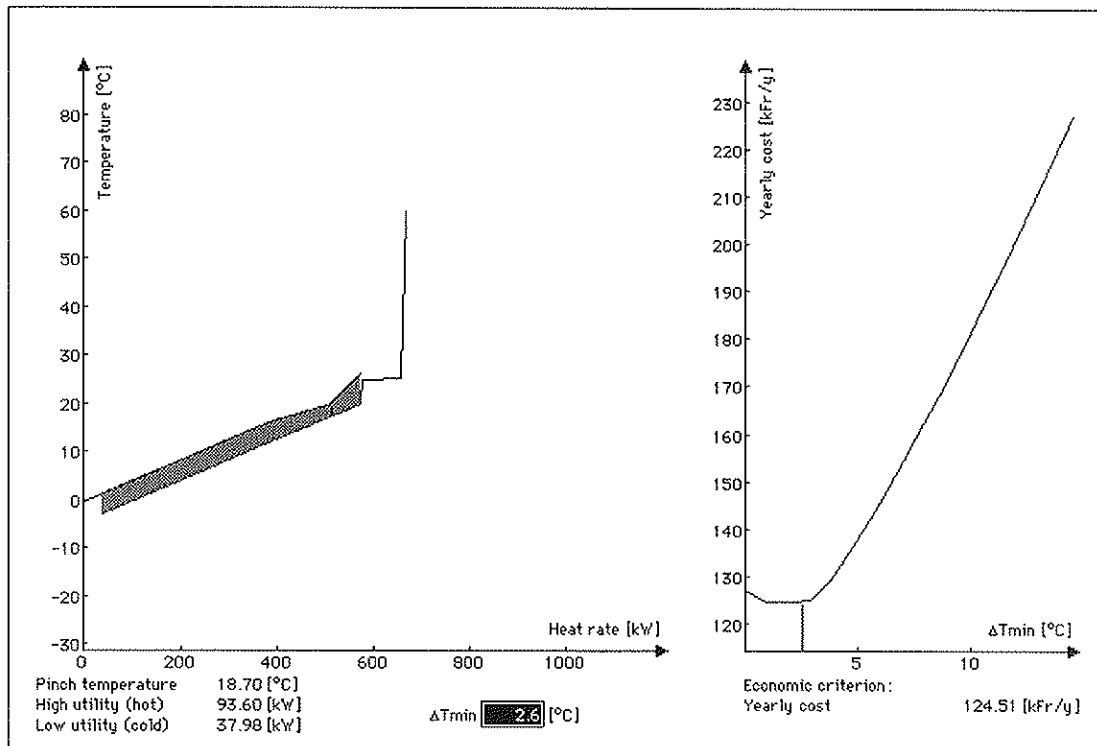


Abb. 5.2.1 Verbund- und Gesamtkostenkurve
Fallbeispiel PSI, Einzelzustand Januar: Tag

5.2.2 Netzwerk Design

Die theoretischen Vorgaben der Verbundkurven (Zielwerte) inkl. der minimalen Temperaturdifferenz können mit Hilfe bestimmten Regeln den sogenannten 'Design -Regeln' zielgerichtet zur optimalen Schaltung Einzelwärmetauschnetzwerk umgesetzt werden, näheres in [4]. Im besten Fall werden die in der Zielwertfindung vorgegebenen Werte erreicht. Liegen vom Betrieb her Einschränkungen (sog. Constraints) vor, die technischer, sicherheitstechnischer, geographischer oder betrieblicher Art sein können, so können diese Zielwerte oft nicht erreicht werden.

Design-Regeln:

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

Fallbeispiel PSI:

Da zehn Einzelzustände definiert wurden, muss das Netzwerk-Design nun zehn Mal separat durchgeführt werden. Es hat sich nun speziell für das PSI gezeigt, dass einzelne Constraints vorhanden sind, die den Entwurf eines Optimalen Netzwerks mit maximaler Wärmerückgewinnung nicht in jedem Fall zulassen:

- Wärmetausch zwischen Zuluftstrom und Umluftkühlgerätestrom ist aus betrieblicher Sicht nicht zweckmässig, da die Zuluft in diesem Fall zu den Umluftgeräten oder umgekehrt, die zu kühlende Umluft für den Wärmetausch zur Zuluft transportiert werden müsste. Ein zusätzliches Zwischenspeichermedium wäre zwar möglich, ist aber mit entsprechenden Verlusten verbunden.
- Wärmetausch zwischen Abluftstrom (durch Waschturm befeuchtet und damit gekühlt) und Umluftkühlgerätestrom ist aus dem gleichen Grund nicht zweckmässig.

5.2.3 'Netzwerk-Loop' infolge Soft-Data Abluft

Die Abluftaustrittstemperatur resp. die Fortlufttemp. ist keine eigentliche Prozessanforderung (vgl. Kap. 5.1.3.1), sondern eine Soft-Data, die derart gewählt werden muss, dass das Netzwerk-Design aufgrund der Verbundkurven möglichst optimal ausgeführt werden kann.

Da diese Einzelnetzwerke anschliessend (Kap. 5.2.4) zu einer Gesamtschaltung zusammengeführt werden, muss ein **optimales Einzelnetzwerk**, nicht nur möglichst dem **MER-Design** (Maximum Energy Recovery = Maximale Energierückgewinnung) entsprechen resp. die Zielwerte bez. Energie- und Kostenziel weitestgehend erfüllen (Kap. 5.2.1), sondern muss auch **Eigenschaften** aufweisen, die eine **Zusammenführung** zu einer **Gesamtschaltung erleichtern**. Dies bedeutet im speziellen, dass

- ⇒ eine Wärmetauscherverschaltung, die nur in einem einzelnen Einzelzustand auftritt, nicht vorteilhaft ist.
- ⇒ Aus dem gleichen Grund ist es auch nicht sinnvoll einzelne Wärmeströme unter- oder oberhalb des Pinches aufzuspillen oder
- ⇒ zwei Wärmetauscher zwischen den gleichen Prozessströmen anzuordnen.

Um diese Netzwerke zu erhalten muss nun für jeden Einzelzustand wie folgt, jeweils iterativ vorgegangen werden:

1. Eine Abluftaustrittstemperatur vorwählen,
2. Gesamtkostenkurve berechnen und Verbundkurve bestimmen (Kap. 5.2.1)
3. Netzwerk-Design nach den Design-Regeln durchführen (Kap. 5.2.2)
4. gefundenes Netzwerk auf obigen Optimierungsgrad prüfen
5. falls optimales Netzwerk nicht erreicht, Abluftaustrittstemperatur geeignet abändern und erneut bei Punkt 2 beginnen.

Je nachdem kann diese Iteration über mehrere Schritte erfolgen. Es zeigt sich aber, dass bei der unabhängigen Optimierung der verschiedenen Einzelzuständen die Änderung der Abluftaustrittstemperatur meist ähnliche Verschaltungen bewirkt. Man bekommt daher mit der Zeit ein Gefühl, ob die Änderung der Abluftaustrittstemperatur sinnvoll ist und wenn ja, wie sie am geeignetsten abgeändert werden kann. Es hat sich gezeigt, dass der optimale Einzelzustand nach 2 bis 5 'Loop's erreicht ist. Eine gute Vorwahl der Abluftaustrittstemperatur kann am einfachsten durch eine vorgängige, überschlägige Berechnung einer Abluft-Zuluft-WRG erreicht werden.

Fallbeispiel PSI:

Es wird nun im folgenden die Vorgehensweise bei der Netzwerkiteration (Ausgangslage und resultierendes Netzwerk) anhand zweier Einzelzustände illustriert. Die übrigen Zustände und auch die jeweiligen Iterationszwischen Schritte sind im Anhang III beigelegt.

- Einzelzustand Januar Tag: (verwendete Prozessbedingungen, siehe Tabelle 5.1.4.1)

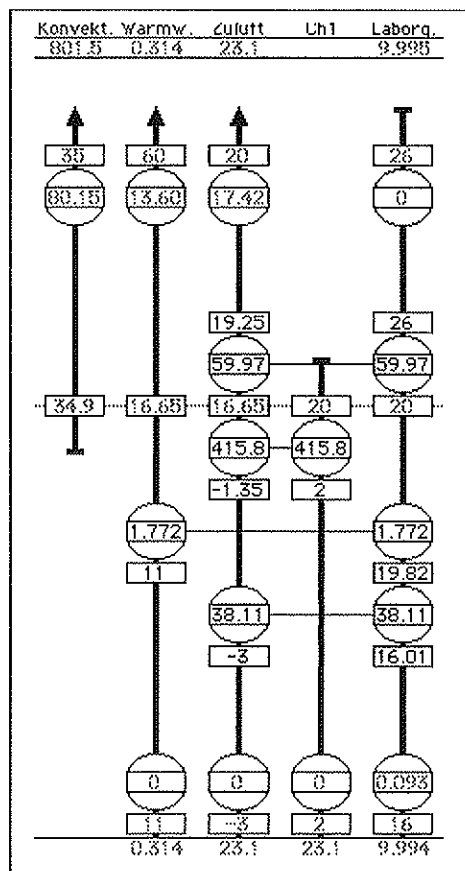


Abbildung 5.2.3.1
Ausgangslage (vor 1. Loop)

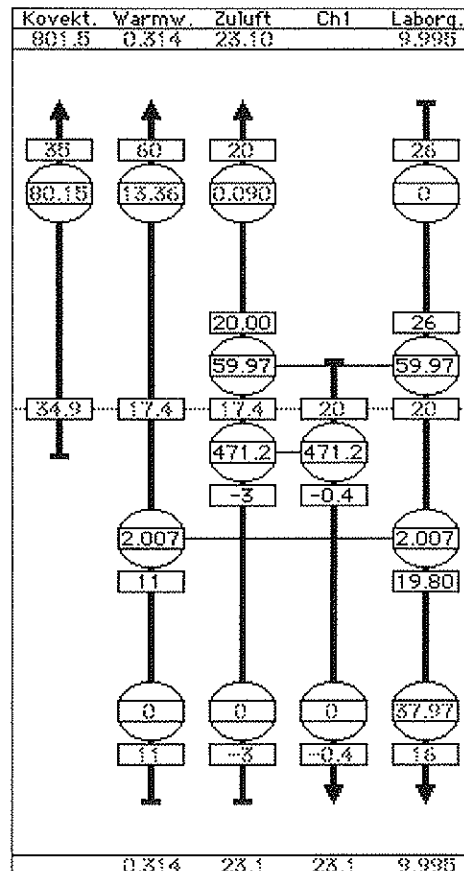


Abbildung 5.2.3.2
resultierendes Netzwerk (nach 2. Loop)

Ausgangsnetzwerk (Abb. 5.2.3.1)

Einzelnetzwerk mit einer ersten Abschätzung der Abluftaustrittstemperatur von 2°C, ergibt einen abzukühlenden Abluftwärmestrom von 416 kW.

⇒ Minimale Temperaturdifferenz: $\Delta T_{\min} = 3.35^\circ\text{C}$

⇒ Ein MER-Design wird erreicht, es ist keine externe Wärme unter dem Pinch ($T=18.3^\circ\text{C}$) und keine externe Kühlung über dem Pinch erforderlich. Die Wärmerückgewinnung erfolgt anhand von vier Wärmetauschern.

⇒ Die beiden Wärmetauscher zwischen den beiden Prozessströmen Zuluft und Laborgeräte sind nicht zweckmässig für das Auffinden der Gesamtverschaltung.

Resultierendes Netzwerk: (Abb. 5.2.3.2)

Nach zweier Netzwerk-Loops erwies sich die Absenkung der Abluftaustrittstemp. auf -0.4°C mit einem abzukühlenden Abluftstrom von 471 kW als die vorteilhafteste Lösung:

⇒ $\Delta T_{\min} = 2.6^\circ\text{C}$

⇒ Ein MER-Design kann wiederum erreicht werden, zudem

⇒ hat sich die Verschaltung auf drei Wärmetauscher vereinfacht, d.h. der eine Zuluft-Laborgeräthewärmetauscher fällt weg, womit dieses Netzwerk einfacher in der Gesamtverschaltung integriert werden kann. Diese Vereinfachung muss aber mit einem zusätzlichen Kältebedarf von 39kW 'bezahlt' werden.

- Einzelzustand: Juli Tag (verwendete Prozessbedingungen, siehe Tabelle 5.1.4.2)

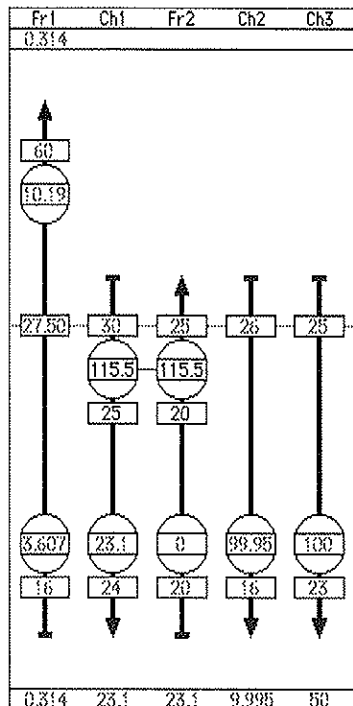


Abbildung 5.2.3.3
Ausgangslage (vor 1. Loop)

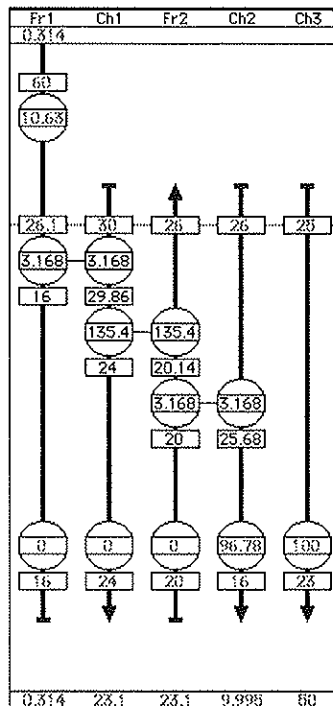


Abbildung 5.2.3.4
Netzwerk (nach 1. Loop)

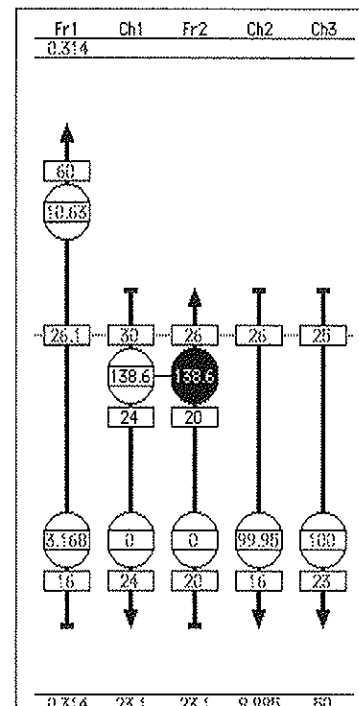


Abbildung 5.2.3.5
Netzwerk (vereinfacht)

Ausgangsnetzwerk (Abb. 5.2.3.3)

Einzelnetzwerk mit einer berechneten Vorwahl der Abluftaustrittstemperatur von 25°C, was einen Abluftwärmestrom von 115,5 kW ergibt

- ⇒ Minimale Temperaturdifferenz: $\Delta T_{\min} = 2,5^\circ\text{C}$
- ⇒ MER-Design kann nicht erreicht werden, ohne den Zuluftstrom unter dem Pinch zu splitten. Dies würde aber eine Integration in die Gesamtverschaltung erheblich erschweren und ist daher nicht sinnvoll.
- ⇒ Erhöhen der Abluftaustrittstemperatur im ersten Loop

Netzwerk (nach 1. Loop) (Abb. 5.2.3.4)

Einzelnetzwerk mit einer 'optimalen' Abluftaustrittstemperatur von 26°C und einem Abluftwärmestrom von 137 kW

- ⇒ Minimale Temperaturdifferenz $\Delta T_{\min} = 2,6^\circ\text{C}$
- ⇒ MER-Design kann ohne aufsplitten der Ströme erreicht werden
- ⇒ Wärme wird vom Warmwasserstrom über den Zu- und Abluftstrom zum Laborgerätestrom transportiert. Da sich nun zeigt, dass der Wärmetauscher zwischen dem Abluftstrom und dem Laborgerätestrom nur in diesem einzelnen Zustand vorhanden ist, drängt sich eine Vereinfachung der Verschaltung auf:

Resultierendes Netzwerk (nach 1. Loop und Vereinfachung der Schaltung) (Abb. 5.2.3.5)

Vergleicht man diese resultierende Schaltung (Abb. 5.2.3.4) mit dem Ausgangsnetzwerk (Abb. 5.2.3.3) so stellt man fest, dass 23 kW weniger Wärme abgeführt werden müssen. Infolge der Netzwerkvereinfachung müssen aber 3,2 kW an Energie unterhalb des Pinches dem System entnommen werden.

Man erkennt aus diesen Beispielen, dass man sich bei der Netzwerkiteration immer vor Augen halten muss, dass man die einzelnen Netzwerke anschliessend zu einer Schaltung 'Prozess-Wärmetauscher'

zusammenführen muss und nicht eine Einzeloptimierung der Einzelzustände nach dem MER-Design primäre Zielsetzung ist.

5.2.4 Zusammenführen der Wärmetauschernetzwerke der verschiedenen Betriebszustände zur Schaltung 'Prozess-Wärmetauscher'

Die Einzelnetzwerke der verschiedenen Betriebszustände liegen nun vor und müssen zu einer Schaltung 'Prozess-Wärmetauscher' zusammengeführt werden und zwar derart, dass mit der Gesamtschaltung alle Betriebszustände 'gefahren' werden können. Folgendes Vorgehen ist zweckmässig:

1. Prozesswärmetauscher der Einzelnetzwerke zwischen gleichen Prozessenströmen spezifizieren, und nach maximaler Austauschfläche und Wärmeleistung in einer Tabelle zusammenfassen. (vgl. Tabelle 5.2.4.1 für Fallbeispiel PSI)
2. Verschaltungsreihenfolge der Wärmetauscher für jeden Einzelzustand in geeigneter Form darstellen. (vgl. Tabelle 5.2.4.2 für Fallbeispiel PSI)
3. Überprüfen, ob die definierten Durchschnittszustände in den Einzelnetzwerken enthalten sind.
4. Schema für Schaltung 'Prozess-Wärmetauscher' erstellen, welches die unter Punkt 1 definierten Wärmetauscher beinhaltet und alle Verschaltungsmöglichkeiten nach Punkt 2 ermöglicht.

Fallbeispiel PSI:

1. Aus den resultierenden Einzelnetzwerken (Anhang III) können vier unabhängige Wärmetauscher eruiert werden:

WT-Nr.	Verknüpfte Prozessenströme	Max. Austauschfläche	Max. Leistung
1	Zuluft – Abluft	1208 m ²	417 kW
2	Laborgeräte – Zuluft	56.5 m ²	60 kW
3	Laborgeräte – Warmwasser	0.8 m ²	3.3 kW
4	Laborgeräte – Abluft	70.1 m ²	57.8 kW

Tabelle 5.2.4.1

2. Die Verschaltungsreihenfolge der Wärmetauscher ergibt sich für die verschiedenen Zustände wie folgt:

Zustand	Anzahl Wärmetauscher	Wärmetauscher nach Tab. 4.2.4.1	Verschaltungsreihenfolge mit Laborgerätestrom
Januar: Tag	3	1, 2, 3	2 → 3
Januar: Nacht	2	1, 2	2
April: Tag	3	1, 3, 4	3 → 4
April: Tag	3	1, 3, 4	3 → 2
Juli: Tag	1	1	-
Juli: Nacht	3	2, 3, 4	3 → 4 → 2
Oktober: Tag	3	1, 3, 4	3 → 4
Oktober: Nacht	3	1, 2, 3	3 → 2
Durchschnitt: Tag	3	1, 2, 3	2 → 3
Durchschnitt: Nacht	2	1, 2	2

Tabelle 5.2.4.2

3. Beide Durchschnittszustände sind in den Einzelzuständen enthalten. Die Verschaltung des Durchschnittzustandes Tag z.B. im Einzelzustand Januar Tag und der Durchschnittzustand Nacht im Einzelzustand Januar Nacht. Diese Verschaltungsreihenfolge ist daher zulässig und sollte alle auftretenden Betriebsfälle abdecken.
4. Schema für Schaltung 'Prozess-Wärmetauscher'

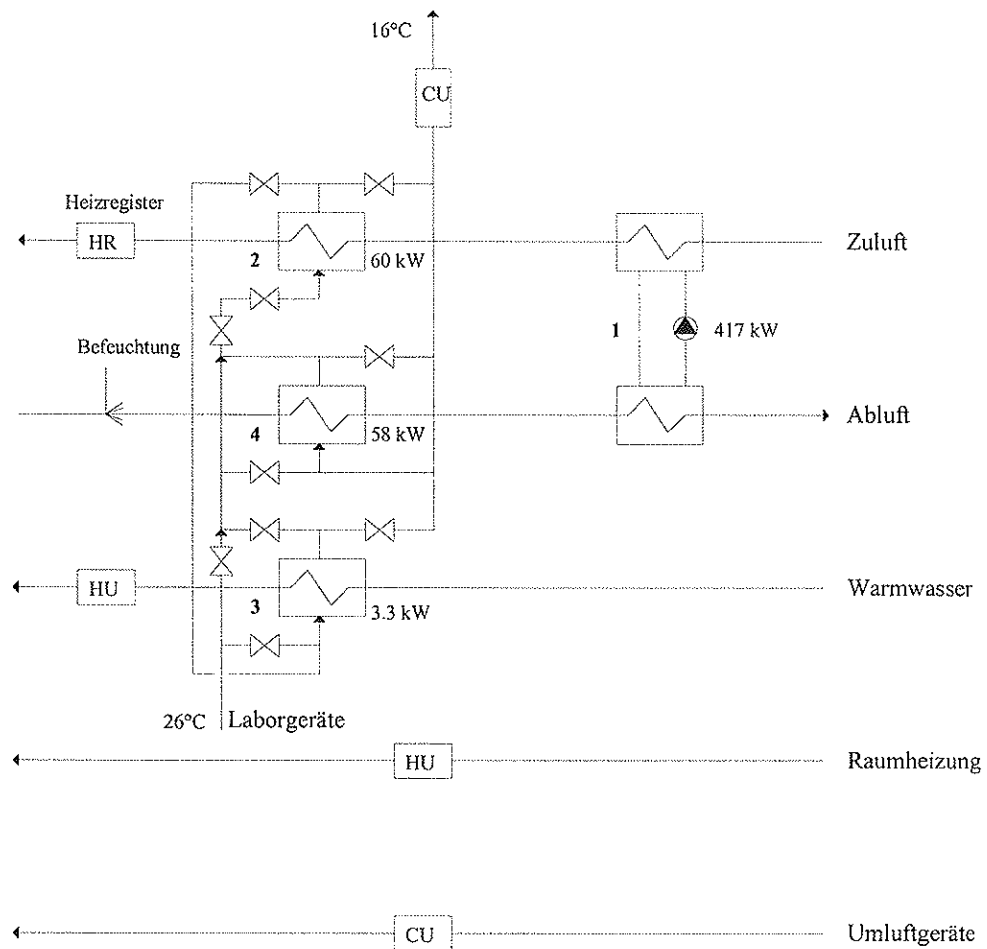


Abbildung 5.2.4 Schaltung 'Prozess-Wärmetauscher'

Mit vier Prozesswärmetauschern und 10 Stellventilen können alle Einzelzustände gefahren werden. Zusätzlich sind fünf Infrastrukturwärmetauscher notwendig, zwei 'Hot Utility'- und zwei 'Cold Utility'-Wärmetauscher, sowie ein Heizregister aus Redundanzgründen.

5.2.5 Vereinfachung der Schaltung 'Prozess-Wärmetauscher'

Wärmetauscher mit geringer Fläche resp. kleiner Leistung können vernachlässigt werden, insbesondere wenn ihr Wegfall zu einer einfacheren Verschaltung führt.

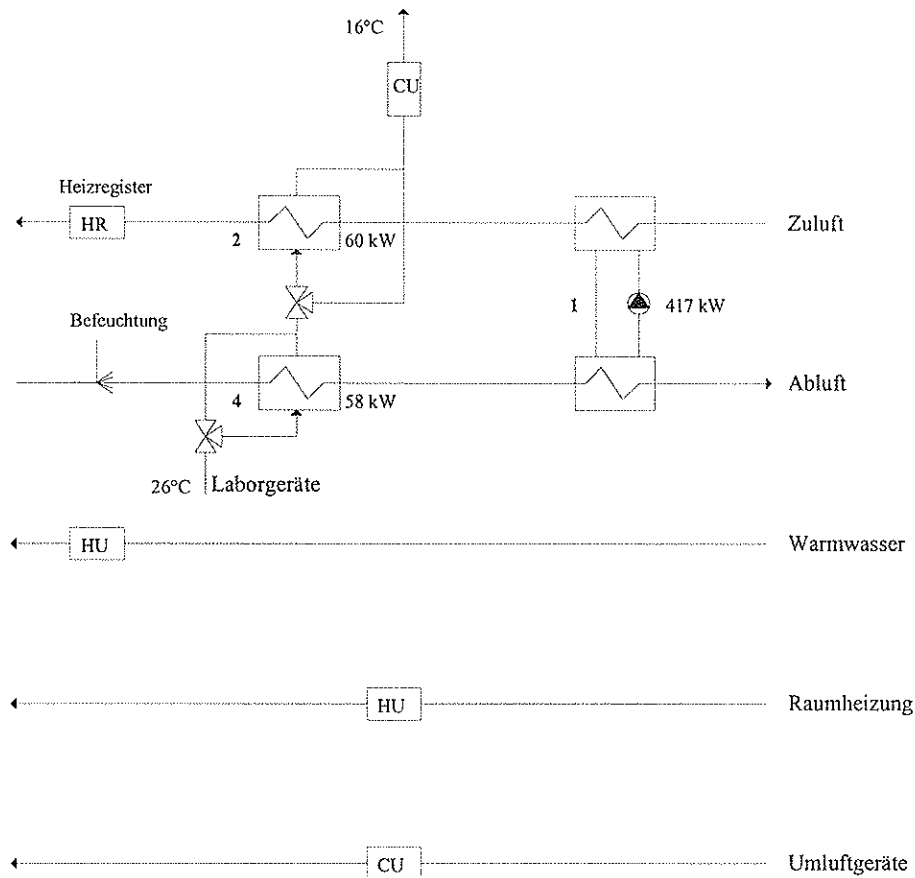
Fallbeispiel PSI:

Abbildung 5.2.5 vereinfachte Schaltung 'Prozess-Wärmetauscher'

Durch die Elimination des Warmwasseres - Laborgerätewärmetauschers (Nr. 3) mit der geringen maximalen Leistung von 3.3 kW können die zehn Stellventile auf zwei Drei-Weg-Ventile reduziert werden. Der dadurch notwendige Infrastrukturmehrverbrauch ist im Vergleich zu den eingesparten Investitionskosten vernachlässigbar.

5.2.6 Ergänzende wirtschaftliche Beurteilung mittels Gebäudesimulationsprogramm

Zu diesem Zeitpunkt ist eine Überprüfung resp. wirtschaftliche Beurteilung der mit der Pinch-Methode erhaltenen Verschaltung der Prozessströme (Abb. 5.2.5) insbesondere der Abluft-Zuluft-WRG mittels des Gebäudesimulationsprogrammes zweckmässig. D.h. durch den Einsatz eines konventionellen und bewährten Programmes kann man sich hinsichtlich der bisherigen Pinch-Optimierung - insbesondere der wirtschaftlichen Kriterien - absichern, bevor man das Haustechnikobjekt in weiteren Schritten bezüglich Wärmespeicherung (dritte Zwiebelschale) und Infrastruktur (vierte Zwiebelschale) ergänzt.

Fallbeispiel PSI:

Für die Gebäudesimulation werden die gleichen Eingangsdaten wie in der Pinch-Analyse verwendet. Insbesondere bei der Spezifikation der Raumdaten müssen Vereinfachungen getroffen werden: Es wird ein einzelner Gesamtraum definiert (Daten entsprechend Kap. 4.3 - Einführung in Fallbeispiel), der das gesamte Gebäudevolumen des PSI ausmacht. Diesem einzelnen Raum werden dann alle internen Lasten, die Lüftungstechnischen Daten, sowie die Wärme- und Kälteverbräuche entsprechend zugeordnet. Die Eingabedaten der Simulation und die erhaltenen Resultate sind in Anhang V vollständig enthalten.

Der Vergleich der Auslegungsdaten der Abluft-Zuluft-WRG der Pinch-Analyse mit dem Gebäudesimulationsprogramm mittels Abbildung 5.2.6 zeigt, dass man mit beiden Methoden die gleiche mittlere Wärmerückgewinnungsmenge von rund 100 kW erhält. Der jährliche Nutzungsgrad kann mit der Pinch-Methode aufgrund der Einteilung in acht Zustände auf 75% abgeschätzt werden und ist geringer als der mit dem Simulationsprogramm berechnete Nutzungsgrad von 95%.

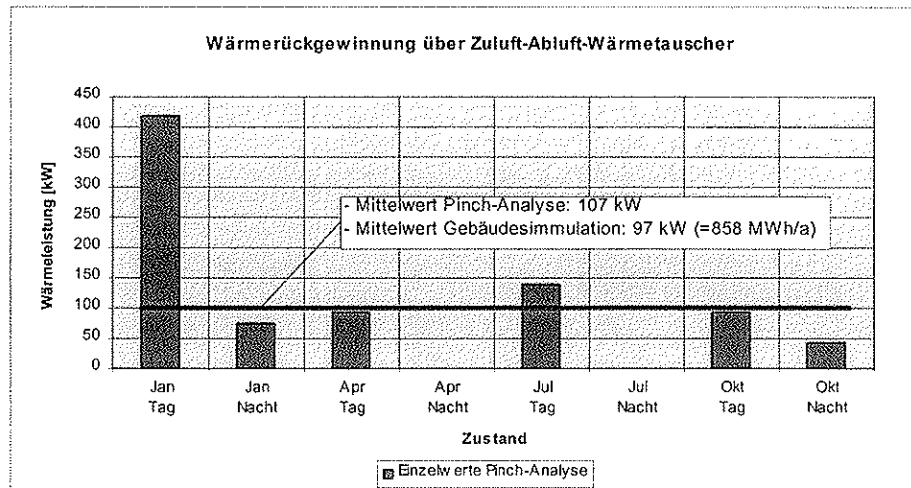


Abb. 5.2.6 Wärmerückgewinnung in Abluft-Zuluft-WRG

In beiden Fällen wird von einem Nenn-Aussenluftvolumenstrom von 70'000 kg/s (=63970 m³/h) während des Tages und einem minimalen Aussenluftvolumenstrom von 10'000kg/s (=8960 m³/h) während der Nacht ausgegangen. Zudem wurde das Verhältnis Zuluft- zu Abluftstrom gleich eins gesetzt. Mittels der Gebäudesimulationsrechnung erhält man im Vergleich zur Pinch-Analyse zusätzlich (Anhang V):

- wirtschaftliche Daten:
 - Jährliche Kapital-, Energie-, Wartungs- und Unterhaltskosten
- Spezifikationen für die Dimensionierung der Wärmerückgewinnungsanlage (im Falle eines Kreisverbundsystems):
 - Art der Umwälzpumpe
 - Grösse des Expansionsgefässes
 - Vordimensionierung der Verbindungsleitungen
- sowie verschiedene zeitabhängige Verläufe:
 - Raumtemperatur in Funktion des Wochentages und Jahreszeit
 - Aussenluftvolumenstrom in Funktion des Wochentages
 - Betriebszeiten und Aussenluftvolumenströme in Abhängigkeit der Aussentemperatur

5.2.7 Resultate Zwiebelschale 2

Die optimale, alle Einzelzustände beinhaltende Schaltung 'Prozess-Wärmetauscher' liegt nun vor. Im weiteren sind der Wärmerückgewinnungsanteil, der Heiz- und Kühlenergiebedarf für jeden Einzelzustand bekannt. Für das Fallbeispiel PSI ist eine Übersicht über diese Wärme- und Kälteleistungen in Kap. 5.4.6 enthalten, da dann auch eine Aufschlüsselung des Infrastrukturbedarfs auf die verschiedenen Heiz- und Kühlenergien vorliegt.

5.3 Optimierung Wärmespeicherung (3. Zwiebelschale)

Eine Wärmespeicherung zwischen den einzelnen Betriebszuständen: z.B. Tag $\leftrightarrow$ Nacht (Kurzzeitspeicher) oder Sommer $\leftrightarrow$ Winter (Langzeitspeicher) kann sinnvoll sein, wenn der Wärmebedarf eines Einzelzustandes durch Nutzung der Abwärme eines anderen Einzelzustandes gedeckt werden kann:

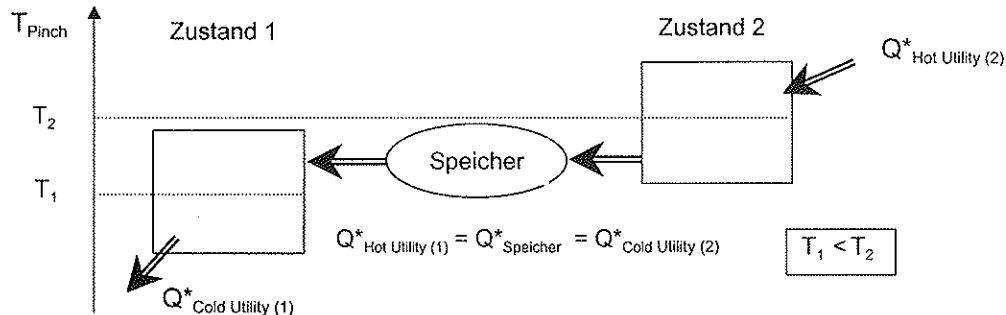


Abb.5.3 Wärmespeicherung zwischen zwei Zuständen

Wie aus Abb. 5.3 ersichtlich, muss für die Pinch Temperaturen $T_1 < T_2$ erfüllt sein, damit Wärme nach der Pinch-Prinzip, dem einen Zustand (Nr. 1) über der Pinch-Temperatur zugeführt und dem anderen Zustand (Nr. 2) unter der Pinch-Temperatur entnommen werden kann. Das heisst, der Heizenergiebedarf des Zustandes 1 würde durch den Kühlenergiebedarf des Zustandes 2 gedeckt.

Auf weitere Ausführungen wird verzichtet, da dass für diese Berechnungen notwendige Programm noch nicht kommerziell zur Verfügung steht. Das Fallbeispiel PSI wird aus diesem Grund hinsichtlich der Wärmespeicherung nicht geprüft resp. optimiert.

5.4 Optimierung der Infrastruktur (4. Zwiebelschale)

5.4.1 Gesamtverbundkurven für jeden Einzelzustand bestimmen

Aus exergetischen Gründen ist das folgende Prinzip bezüglich der Energieversorgung bekannt:

- für **Heizenergie**: Verwendung der Heizenergie in den Prozessen auf möglichst hohem Temperaturniveau hingegen Produktion der Heizenergie auf möglichst tiefem Temperaturniveau
- für **Kühlenergie**: Verwendung der Kühlenergie in den Prozessen auf möglichst tiefem Temperaturniveau hingegen Produktion der Kühlenergie auf möglichst hohem Temperaturniveau.

Um folglich für jeden Betriebszustand dieses Prinzip anwenden zu können, sind als Hilfestellung die sogenannten „Gesamtverbundkurven“ notwendig. Diese können aus gleichen Basisdaten wie die Verbundkurven, nämlich aus den Prozessanforderungen gewonnen werden, näheres in [4]. Die einzelnen Gesamtverbundkurven für die Einzelzustände sind folglich aus den in Kap. 5.2.1 im jeweiligen 'letzten Netzwerkiterationsschritt' verwendeten Prozessdaten aufzubauen.

Fallbeispiel PSI: Für die Zustände Januar Tag und Juli Tag sind die Gesamtverbundkuren in Kap. 5.4.3 enthalten und mit Infrastruktur ergänzt. Alle anderen Gesamtverbundkurven sind in Abhang IV beigelegt.

5.4.2 Spezifikation der vorhandenen, resp. der zugänglichen Infrastruktur (Utilities)

Bevor irgendwelche neue Infrastruktur eingesetzt wird, d.h. bevor z.B. ein Heizkessel, eine Wärmepumpe oder ein Sonnenkollektoren für das Haustechnikobjekt geplant wird um den Infrastrukturbedarf abzudecken ist es sinnvoll, zuerst alle vorhandenen resp. einfach verfügbaren oder zugänglichen Infrastruktur einzusetzen resp. soweit wie möglich auszunutzen. Beispiele hierfür sind:

- Flusswasser oder Seewasser $\rightarrow$ ist dieses in der Nähe eines Haustechnikobjekts resp. einfach verfügbar, so kann es als Kühlenergie einfach nutzbar gemacht werden, bevor eine Kältemaschine

für die Abdeckung des Kühlbedarfs eingesetzt wird. Voraussetzung ist, dass das notwendige Temperaturniveau unterschritten wird.

- Fernwärme → ist eine Fernwärmeversorgung vorhanden, so ist es zweckmässig, den Wärmebedarf zuerst durch diese Wärmequelle abzudecken, bevor ein Heizkessel zum Einsatz gelangt. Voraussetzung hierfür ist, dass das Temperaturniveau der Fernwärme grösser ist als das der Wärmeverbraucher.

Um diese Infrastrukturen verwenden zu können, müssen sie zuerst geeignet spezifiziert werden, dass heisst, das verfügbare Temperaturniveau resp. die Anfangstemperatur jedes Stromes muss für jeden Einzelzustand definiert werden. Die restlichen Infrastrukturgrössen (T_{Aus1} , m^* , ...) können erst durch eine Abschätzungen mit Hilfe der Gesamtverbundkurven gewonnen werden.

Fallbeispiel PSI:

Die beiden verfügbaren Infrastrukturen Flusswasser (Aare) und Fernwärme können entsprechend den Einzelzuständen wie folgt spezifiziert werden:

Zustand	Fernwärme $T_{\text{Anf}} [^{\circ}\text{C}]$	Flusswasser $T_{\text{Anf}} [^{\circ}\text{C}]$
Januar: Tag	97	8
Januar: Nacht	97	8
April: Tag	76	12
April: Nacht	76	12
Juli: Tag	70	21
Juli: Nacht	70	21
Oktober: Tag	76	16
Oktober: Nacht	76	16

Abbildung 5.4.2 Spezifikation der vorhandenen Infrastruktur

5.4.3 Gesamtverbundkurven mit Infrastruktur ergänzen, Restbedarf bestimmen

Die spezifizierte Infrastruktur wird nun zweckmässig in die Gesamtverbundkurven der Einzelzustände eingetragen. Zweckmässig heisst, dass die Austrittstemperatur des Infrastrukturstromes derart gewählt werden muss, dass einerseits eine maximale Abdeckung des Infrastrukturbedarfs möglich ist, aber andererseits die Infrastrukturkosten (benötigter Massenstrom) minimal werden. Ein minimaler Massenstrom wird wiederum nur erreicht, wenn die Temperaturdifferenz des Infrastrukturstromes (End- minus Anfangstemperatur) maximal gewählt wird. Für die Heizenergie bedeutet dies, dass die Rücklauftemperatur (Endtemperatur) minimal und für die Flusswasser die Rücklauftemperatur (Endtemperatur) maximal zu wählen ist. Die restlichen Infrastrukturanforderungen (Massenstrom, Endtemperatur) lassen sich dann aus den Gesamtverbundkurve bestimmen.

Bemerkung: Ist das Temperaturniveau der vorhandenen Heizenergie nicht genügend hoch, resp. das Temperaturniveau der vorhandenen Kühlenergie nicht genügend tief, so kann nicht der gesamte Infrastrukturbedarf abgedeckt werden und es muss zusätzlich Infrastruktur eingefügt werden. (vgl. Kap. 5.4.4)

Fallbeispiel PSI:

- Einzelzustand Januar: Tag

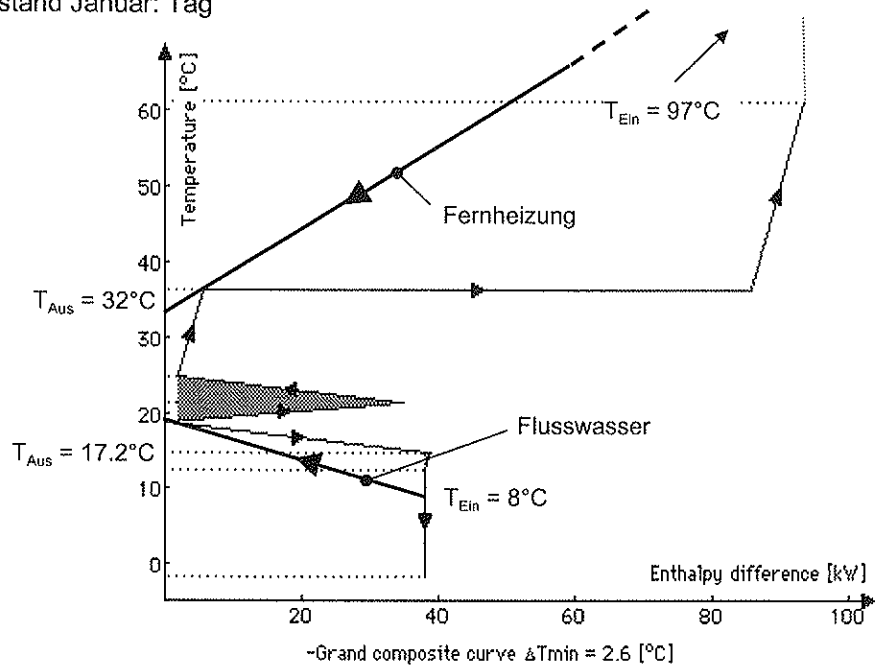


Abbildung 5.4.3.1: Gesamtverbundkurve Einzelzustand Januar: Tag

Mit der Fernwärme und der Flusskühlung lässt sich der gesamte Infrastrukturbedarf abdecken. Die restlichen Infrastrukturanforderungen ergeben sich aus der Gesamtverbundkurve wie folgt:

Januar: Tag	T_{Anf} [°C]	T_{End} [°C]	$\dot{m}^*$ [kg/s]	c_p [kJ/(kgK)]	p [bar]	α [W/m²K]	Q [kW]
Flusswasser	8	17.2	0.99	4.182	1	2000	38
Fernheizung	97	32	0.34	4.182	12	2000	93.6

Tabelle 5.4.3.1: Infrastrukturanforderungen Einzelzustand Januar: Tag

- Einzelzustand Juli: Tag

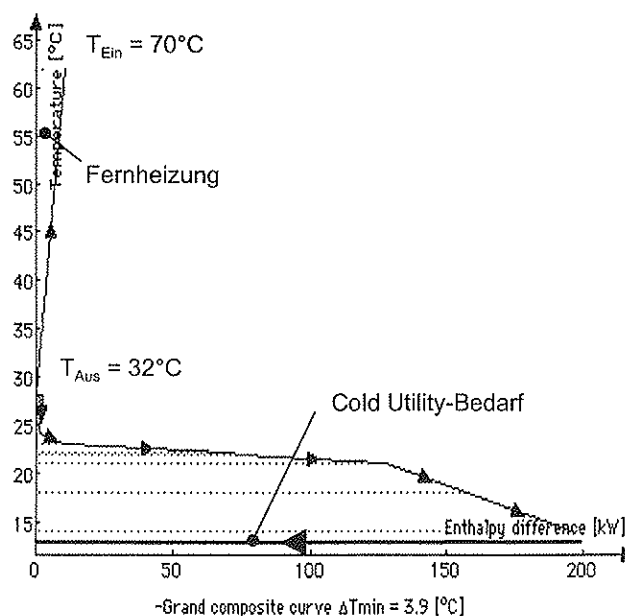


Abbildung 5.4.3.2: Gesamtverbundkurve Einzelzustand Juli: Tag

Mit der Fernwärme kann wiederum der gesamte Heizenergiebedarf abgedeckt werden. Hingegen ist das Flusswassertemperaturniveau für diesen Zustand zu hoch ($T_{ANF}=21^{\circ}\text{C}$, vgl. Tab. 5.4.2), folglich muss der Kältebedarf durch eine zusätzliche Infrastruktur abgedeckt werden. Die Anforderung an die Fernheizung ergeben sich für diesen Zustand wie folgt:

Juli: Tag	T_{Anf} [$^{\circ}\text{C}$]	T_{End} [$^{\circ}\text{C}$]	m^* [kg/s]	c_p [kJ/(kgK)]	P [bar]	α [W/m ² K]	Q [kW]
Fernheizung	70	32	0.07	4.182	12	2000	10.6

Tabelle 5.4.3.2: Infrastrukturanforderungen Einzelzustand Juli: Tag

Alle übrigen Gesamtverbundkurven mit der entsprechenden Infrastruktur sind im Anhang IV beigelegt.

5.4.4 Mit allen Einzelzuständen kompatible Infrastruktur einführen

Der Infrastrukturbedarf, der nicht durch die vorhandene Infrastruktur abgedeckt werden kann, muss durch zusätzliche Heiz- und Kühlenergiequellen gedeckt werden. Diese müssen derart ausgewählt werden, dass sie mit allen Einzelzuständen kompatibel sind, resp. den gesamten Restbedarf abdecken. Als zusätzliche Infrastruktur eignen sich für die Deckung des Heizenergiebedarfs z.B. Sonnenkollektoren oder ein Heizkessel. Für die Deckung des Kühlenergiebedarfs kommt meist nur der Einsatz einer Kältemaschine in Frage.

Fallbeispiel PSI:

- Heizenergie: Mit der Fernwärme können alle Bedarfsfälle abgedeckt werden. Folglich ist keine zusätzliche Infrastruktur mehr erforderlich.
- Das Temperaturniveau des Flusswassers ist in den Sommermonaten zu hoch. Es ist daher notwendig diese Kühlenergie mit einem Kälteaggregat auf einem Verdampfniveau von $T_{\text{verd.}}=10^{\circ}\text{C}$ bereitzustellen. Im Gegenzug kann dann der Kondensator durch das Flusswasser gekühlt werden. (Das Verdampfniveau des Kälteaggregats ist in den entsprechenden Gesamtverbundkurven in Anhang IV eingetragen.)

5.4.5 Ergänzung der Schaltung Prozess-Wärmetauscher mit Infrastruktureinrichtungen

Die Schaltung 'Prozess-Wärmetauscher' (Abb. 5.2.4) muss nun mit den Infrastrukturströmen und der entsprechenden Verschaltung ergänzt werden. Sind mehrere 'Hot Utility' - Wärmetauscher resp. mehrere 'Cold utility' - Wärmetauscher mit einem Infrastrukturstrom zu verschalten, so ist eine Parallelschaltung dieser Wärmetauscher die einfachste Lösung, da eine Unterschreitung der minimalen Temperaturdifferenz nicht stattfinden kann. Bei einer allfälligen Serieschaltung oder einer anderen Verschaltungsart sollte eine vorgängige Prüfung der Verschaltung mittels des 'Balanced Grid [2] (Pinch Netzwerk mit Infrastrukturwärmetauschern) durchgeführt werden. Auf eine Ausführung dieser Optimierungsmethode muss hier verzichtet werden, da dies den Umfang dieser Wegleitung überschreiten würde.

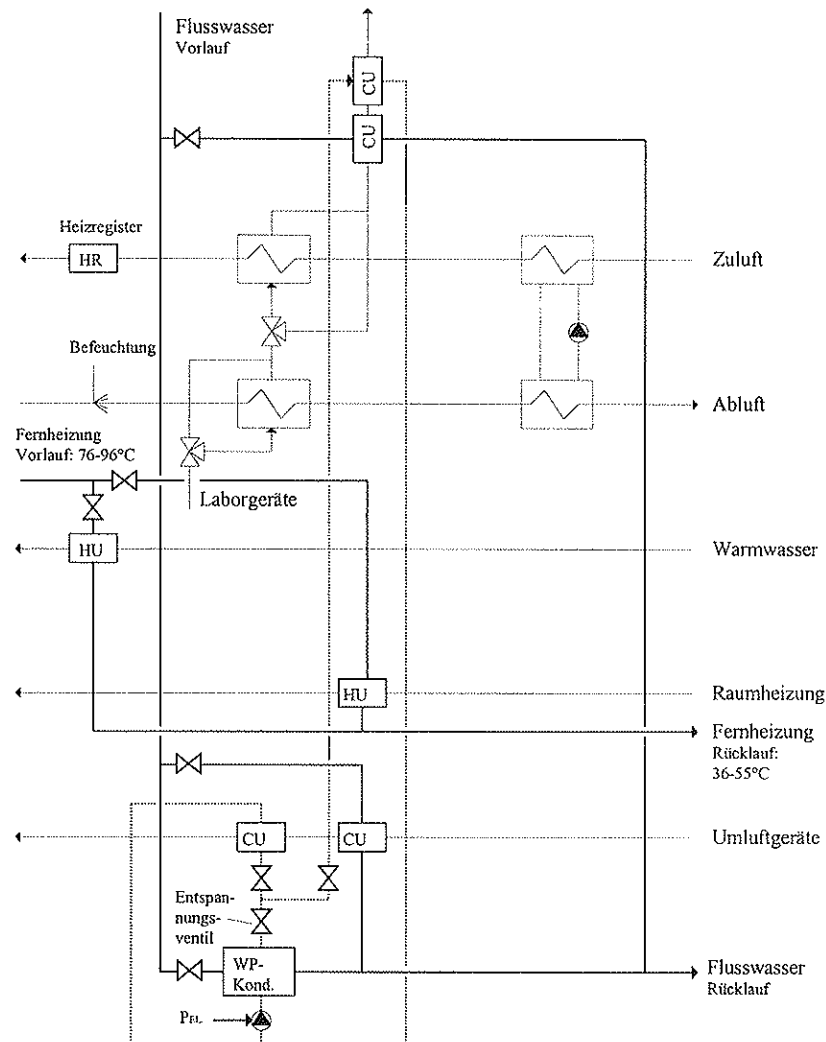
Fallbeispiel PSI:

Abbildung 5.4.5 Ergänzung der Schaltung 'Prozess-Wärmetauscher' mit Infrastruktureinrichtungen

Alle Infrastrukturströme werden jeweils parallel mit den einzelnen Prozessströmen verschaltet. Das Flusswasser dient der Kühlung der Laborgeräte und des Wärmepumpenkondensators; die Fernheizung der Beheizung des Warmwassers und der Raumheizung und mit der Wärmepumpe erfolgt die ergänzende Kühlung der Umluft- und Laborgeräte während den Sommermonaten.

5.4.6 Resultate Zwiebschale 4

Als Resultat der vierten Zwiebschale sind die Infrastruktureinrichtungen spezifiziert. Im weiteren liegt die entsprechende Verschaltung der Infrastruktureinrichtungen mit den Prozessströmen vor. Der genaue Infrastrukturbedarf während den einzelnen Betriebszuständen ist aus den Gesamtverbundkurven ersichtlich.

Fallbeispiel PSI:

Mit der Schaltung 'Prozess-Wärmetauscher' mit Infrastruktureinrichtungen (Abb. 5.4.5) können folglich alle acht Einzelzustände, sowie die beiden Durchschnittszustände, gefahren werden. Die Wärmetauscherleistungen der Prozess- und Infrastrukturströme können für jeden Zustand in Tabellenform für die aufzuheizenden Ströme (Cold Streams) und abzukühlenden Ströme (Hot Streams) zusammengefasst werden. Januar Tag und Juli Tag sind im folgenden dargestellt. Die übrigen Zustände sind in Anhang VI enthalten.

Januar: Tag		Hot streams										
Tmin = 1.6°C, 99.19 kFr./y		Zuluft		Abluft		Laborappar.		Umluft		Hot utility	Fernheiz.	WP.-K.
Q _{tot} =627kW,A _{tot} =1265 m²		Q*[kW]	A[m²]	Q*[kW]	A[m²]	Q*[kW]	A[m²]	Q*[kW]	A[m²]	Q*[kW]	Q*[kW]	Q*[kW]
Cold streams	Zuluft			417	1208	60	56.5					
	Abluft											
	Raumheizung									80.15	80.15	
	Warmwasser					2.01	0.4			13.36	13.36	
	Cold utility					38						
	Flusswasser					38						
	WP- Verdampfer											

Tabelle 5.4.6.1 Zusammenfassung des Zustandes Januar: Tag

Juli: Tag		Hot streams										
Tmin = 1.6°C, 99.19 kFr./y		Zuluft		Abluft		Laborappar.		Umluft		Hot utility	Fernheiz.	WP.-K.
Q _{tot} =627kW, A _{tot} =1265 m²		Q*[kW]	A[m²]	Q*[kW]	A[m²]	Q*[kW]	A[m²]	Q*[kW]	A[m²]	Q*[kW]	Q*[kW]	Q*[kW]
Cold streams	Zuluft											
	Abluft	139	231									
	Raumheizung											
	Warmwasser									13.8	13.8	
	Cold utility					100		100				
	Flusswasser											300
	WP- Verdampfer					100		100				

Tabelle 5.4.6.2 Zusammenfassung des Zustandes Juli: Tag

Einzig im Abluft-Zuluft Wärmetauscher findet die Wärmeübertragung in beiden Richtungen statt, d.h. sind die Zu- und Abluft sowohl Hot wie auch Cold Streams. In Tabelle 5.4.6.3 sind im weiteren die maximalen Übertragungsleistungen und Wärmetauscherflächen aus allen Einzelzuständen+, die als Auslegungsgrößen für die Gesamtschaltung dienen, zusammengefasst.

Total maximal		Hot streams									
		Zuluft		Abluft		Laborappar.		Umluft	Hot utility	Fernheiz.	WP.-K.
Q _{tot} =972 kW,A _{tot} =1746 m ²		Q*[kW]	A[m ²]	Q*[kW]	A[m ²]	Q*[kW]	A[m ²]	Q*[kW]	A[m ²]	Q*[kW]	Q*[kW]
Cold streams	Zuluft			417	1208	60	56.5				
	Abluft	139	411			57.8	70.1				
	Raumheizung								80.15	80.15	
	Warmwasser					3.3	0.8		15.4	15.4	
	Cold utility					100		100			
	Flusswasser					41.3		0.0			300
	WP- Verdampfer										

Tabelle 5.4.6.3 Auslegungsgrößen für die Gesamtschaltung

6. Verallgemeinerung

6.1 Verallgemeinerung der Erkenntnisse des Fallbeispiels auf unterschiedliche Haustechnikobjekte

Unterschiedliche Haustechnikobjekte enthalten meist die gleichen resp. ähnliche wärme- bzw. kälterelevanten Installationen.

1. mechanische Gebäudelüftung
2. Gebäudeklimatisierung
3. Warmwasseraufbereitung
4. spezieller interner Kältebedarf (gekühlte Geräte, Kälteraum, usw.)
5. spezieller interner Wärmebedarf (Öfen, Trockenräume, usw.)

Entsprechend lassen sich auch in den meisten Fällen ähnliche Prozessanforderungen identifizieren (vgl. 5.1.2) und zwar

1. Zuluftstrom
2. Abluftstrom
3. Aufzuheizender Warmwasserstrom
4. Aufzuwärmende Ströme infolge internem Kältebedarf (Rückerwärmung)
5. Abzukühlende Ströme infolge internem Wärmebedarf (Rückkühlung)

Bei zwei analog gebauten Haustechnikobjekten mit gleichem Nutzungsgrad kann ein unterschiedlicher Standort, da die Aussentemperatur insbesondere auf die Zu- und Abluftströme eine dominierende Rolle spielt, zu einem unterschiedlichen Wärme- oder Kälteverbrauch führen. Die einzelnen Prozessströme bleiben dann bei beiden Objekten zwar gleich, sie können aber sowohl untereinander ein unterschiedliches Verhältnis annehmen, als auch eine andere zeitliche Abhängigkeit aufweisen. Folglich würde man somit bei der Unterteilung in Einzelzustände (vgl. Kap. 5.2), keine identische Einteilung erhalten und damit eine andere Schaltung Prozess-Wärmetauscher herleiten. Eine Verallgemeinerung auf unterschiedlicher Haustechnikobjekte muss daher auch den Standort resp. die Aussentemperatur berücksichtigen. Dies kann am besten mittels einer Gebäudetyp-Standort-Matrix erfolgen, die eine Gewichtung der Aussentemperatur ermöglicht.

Gebäudetyp nach SIA	Standort (Einfluss Aussentemperatur)									
	Geringer Gebäudeheizungs- resp. Gebäudeklimatisierungsbedarf					Grosser Gebäudeheizungs- resp. Gebäudeklimatisierungsbedarf				
	- Heizung: $120 < HGT_{20/12}$ - Klimatisierung: nicht oder nur geringfügig notwendig					- Heizung: $120 > HGT_{20/12}$ - Klimatisierung: starke Klimatisierung notwendig				
	Zuluft- strom	Abluft- strom	Warm- wasser	Aufzu- heizende Ströme	Abzu- kühlende Ströme	Zuluft- strom	Abluft- strom	Warm- wasser	Aufzu- heizende Ströme	Abzu- kühlende Ströme
Kat. III										
Verwaltung	xx	xx	xx	x	x	xxx	xxx	xx	x	x
Schule	xx	xx	Xx	x	x	xxx	xxx	Xx	x	x
Bibliothek	xx	xx	x	0	0	xxx	xxx	x	0	0
Laden	xx	xx	x	xx	xx	xxx	xxx	x	xx	xx
Kat. IV										
Industriebau	x	x	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
Lager	0	0	0	0	0	xx	xx	0	0	0
Werkhof	x	x	x	x	x	xx	xx	x	x	x
Bahnhof	0	0	x	0	0	x	x	x	0	0
Kat. V										
Labor	xx	xx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
Spital	xx	xx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
Bad	x	x	xxx	xxx	0	xxx	xxx	xxx	xxx	0

0 nicht relevant

x geringer Einfluss

xx mittlerer Einfluss

xxx grosser Einfluss

Tabelle 6.1 Gebäudetyp-Standort-Matrix

Die Tabelle 6.1 zeigt tendenziell auf, in welchem Verhältnis die einzelnen Prozessströme (Leistungen) untereinander in Abhängigkeit des Standorts und Typ des Haustechnikobjekts stehen, aber auch wie schwierig es ist, eine Grobabschätzung der einzelnen Prozessströme anzugeben. Eine weiterführende Abschätzung, die aufzeigt in welcher Art z.B. eine zeitliche Unterteilung durchgeführt werden kann, oder in welcher Art eine mögliche Schaltung „Prozess Wärmetauscher“ aussehen kann, ist im vorhinein nicht möglich, da zu viele Parameter erst während der Pinch-Analyse definiert werden können.

Fazit: Aufgrund des durchgeführten Fallbeispiels konnte die Vorgehensweise der Pinch-Analyse für ein Haustechnikobjekt zwar sehr allgemein und übertragbar auf andere Objekte dargelegt werden, eine Verallgemeinerung von Erkenntnissen aufgrund deren eine Abkürzung oder Vereinfachung der Pinch-Analyse bei ähnlichen Objekten zulässt, ist aufgrund der Komplexität nicht möglich. Auch wenn zwei Objekte identisch sind, sogar den gleichen Nutzungsgrad aufweisen, sich aber an unterschiedlichen Standorten befinden, muss man jeweils die gesamte Pinch-Analyse separat durchführen. Eventuell können aber nach Durchführung der Pinch-Analyse bei mehreren Objekten entsprechende Parallelen gefunden werden.

6.2 Übersicht und Grenzen der Pinch-Methode in der komplexen Haustechnik

Bestätigung von bestehenden Anlagenverschaltungen:

Mit der Pinch-Analyse werden auf jeden Fall alle Anlagenverschaltungen resp. Potentiale gefunden - auf Prozess, wie auch auf Infrastrukturebene - die auch konventionell eruiert werden können.

Betrachtet man z.B. die Schaltung Prozess-Wärmetauscher (Kap. 5.2.5) des Fallbeispiels PSI, so entspricht die Zuluft-Abluft-WRG der üblicherweise mit der konventionellen Methode erhaltene Verschaltung. Für die Infrastrukturebene wird wie aus Abb. 5.4.5 ersichtlich, ebenfalls wie mit entsprechenden konventionellen Methoden üblich, eine Verschaltung mit der Fernheizung, Flusswasser und einer zusätzlichen eingefügten Wärmepumpe erreicht.

Durch die Verwendung des Gebäudesimulationsprogrammes DOE-2 (konventionelle Methode) kann die gefundene Anlagenverschaltung auf Prozessebene (z.B. Abluft-Zuluft-WRG) auf ihre Wirtschaftlichkeit überprüft werden. Die Anwendung der Pinch-Methode in der Haustechnik ergänzt daher die konventionelle Methoden aufgrund ihrer gesamtheitlichen Betrachtungsweise und steht nicht in Konkurrenz zu ihnen.

Definition von neuen Anlagenverschaltungen:

Mittels der Pinch-Analyse kann zusätzliches WRG-Potential sogar unter Mitberücksichtigung zeitlich ändernder Prozessanforderungen erschlossen werden. Beispiel hierfür ist die zeitliche unterschiedliche Verschaltung mittels der zwei Drei-Weg-Ventile des Prozessstromes Laborgeräte mit den Prozessströmen Zuluft und Abluft, die mittels konventioneller Methoden nicht gefunden worden wären. (Abb. 5.2.5 des Fallbeispiels PSI). In diesen beiden Wärmetauschern können je nach Zustand jeweils bis zu 60 kW an zusätzlicher Leistung zurückgewonnen werden.

Grenzen der Pinch-Methode:

Der Einsatz der Pinch-Methode in der Haustechnik ist dadurch begrenzt, dass sie nur einsetzbar ist,

- wenn die einzelnen Prozessanforderungen voneinander derart abgegrenzt werden können, dass man sich nicht allzu weit vom Ist-Zustand des Haustechnikobjekts entfernt (Kap. 5.1.2) und
- man die zeitlichen Änderungen der einzelnen Verbraucher systematisch durch eine Unterteilung in signifikante Zustände sinnvoll wiedergeben kann (Kap. 5.1.4)

Zusammengefasst: Je stärker die einzelnen Prozesse miteinander gekoppelt resp. voneinander abhängig sind und je stochastischer der zeitliche Verlauf der einzelnen Verbraucher, desto aufwendiger und schwieriger wird die Anwendung der Pinch-Methode. Sind die Objekte hingegen klein und nicht sehr komplex, so lohnt sich der Aufwand für die Pinch-Methode nicht mehr. Dies ist z.B. bei Gebäuden der Kat. I (Einfamilienhäuser) und II (Mehrfamilienhäuser) nach SIA 381.1 der Fall.

6.3 Gebäudesimulation

Es hat sich herausgestellt (Kap. 5.2.6), dass die Durchführung der Gebäudesimulation in Ergänzung zur Pinch-Analyse sinnvoll ist. Bei der Wahl der gleichen Eingangsdaten für beide Methoden erhält man die gleiche ‚Schnittmenge‘ nämlich die energetischen Daten der Abluft-Zuluft-WRG, die bei beiden im Optimalen Fall im gleichen Rahmen zu liegen kommen sollte. Mittels der Gebäudesimulation kann die Abluft-Zuluft-WRG zusätzlich bezüglich der Dimensionierung der wirtschaftlichen Daten und der zeitabhängigen Verläufe ausgelgt werden. Dafür erhält man mit der Pinch-Methode die weiteren Verschaltungsmöglichkeiten mit den übrigen Prozessströmen (WRG's), die Infrastruktur wird eingebunden und die Möglichkeiten der Wärmespeicherung wird aufgezeichnet.

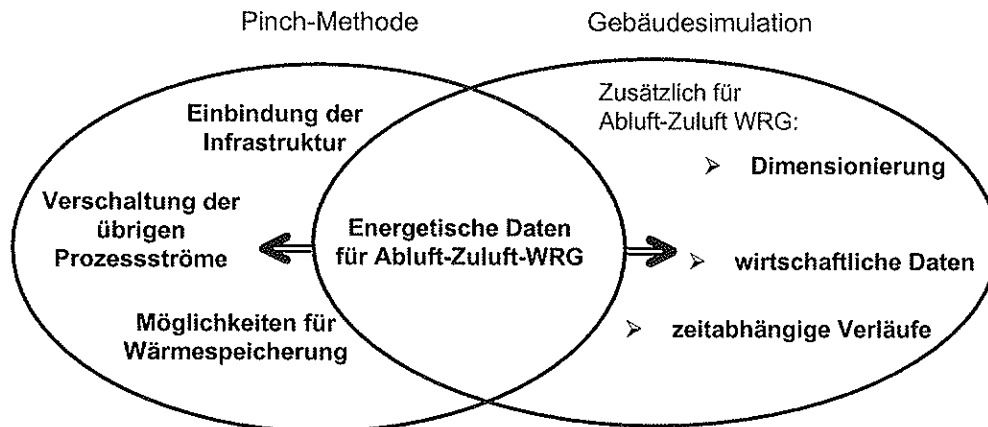


Abb. 6.3 Gegenüberstellung Pinch-Methode $\Leftrightarrow$ Gebäudesimulation

Je nachdem in welcher Art die beiden Methoden in Zukunft weiterentwickelt werden, wird die Schnittmenge grösser und die Methoden ergänzen sich gegenseitig noch optimaler. Werden beispielsweise die internen Lasten (z.B. Rückkühlung der Laborgeräte) in der Gebäudesimulation mitberücksichtigt, d.h. wird die numerische Iteration entsprechend ergänzt, so sollten auch diese Verschaltungen resp. Wärmerückgewinnungspotentiale berechnet werden können. Für ein weiteres Vorgehen wird insbesondere diese Ergänzung vorgeschlagen.

7 Symbolverzeichnis

A	Fläche	[m ²]
α	Wärmeübergangskoeffizient	[W/m ² K]
cp	Wärmekapazität	[kJ/kgK]
CP	Wärmekapazitätsstrom (= $m^* \times cp$)	[kJ/sK]
Cr	Modellfaktor	[Fr.]
ff	Faktor Transport und Installation	[-]
K	Kosten für Wärmeübertrager	[Fr.]
k	Wärmedurchgangskoeffizient	[W/m ² K]
m^*	Massenstrom	[kg/s]
p	Druck	[bar]
Q^*_T	Transmissionsverluste	[W, kW]
Q^*	Wärmestrom	[W, kW]
ra	Aktualitätsfaktor	[-]
T	Temperatur	[°C]
T_{Anf}	Anfangstemperatur	[°C]
T_{End}	Endtemperatur	[°C]
T_{min}	minimale Temperatur	[°C]
ΔT_{min}	minimale Temperaturdifferenz	[°C]
V^*	Volumenstrom	[m ³]

Abkürzungen:

MER-Design	M aximum E nergy R ecovery Design (=maximale Energierückgewinnung)
PM	P inch- M ethode
WRG	W ärmerückgewinnung

8 Literaturverzeichnis

- [1] Foundation Course in Pinch Analysis, UMIST Manchester, England, 1993
- [2] **Linnhoff B.**, User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy, The Institution of Chemical Engineers 1982, Rugby, England (Grundlagenwerk)
- [3] **Linnhoff B.**, Pinch Analysis - A State of the Art Overview, Trans|ChemE, Vol. 71, Part A, September 1993 (Übersichtsartikel)
- [4] **Morand R. et al.**, Einführung in die Prozessintegration mit der Pinch-Methode, Bundesamt für Energie, Februar 1998, Zürich und Neuenhof, ENET-Artikel 30914¹
- [5] **Staine F.**, Logiciel PinchLeni - Version 2.0 PC Windows, Bundesamt für Energiewirtschaft 1995, ENETArt. 30374. Eine Demoversion kann bezogen werden bei P. Krummenacher, LENI-DGM, EPFL, 1015 Lausanne
- [6] **Krummenacher P. et al.**, Intégration énergétique de procédés industriels par la méthode du pincement aux procédés discontinus, l'Office fédéral de l'énergie, Septembre 1995, Lausanne, ENET-Nummer 9200881¹

¹ 031-350-00-05 Fax 031-352-77-56 n+1@email.ch