

Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik
der TU München

**Rechnergestütztes Instrument zur betrieblichen
Energieoptimierung**

Herbert Kuhn

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informations-
technik der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen
Grades eines Doktor Ingenieurs genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Alexander W. Koch

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Lucas,
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Die Dissertation wurde am 21.06.2001 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am
12.10.2001 angenommen.

Abstract

Mit dieser Arbeit wurde erstmals ein computergestütztes Verfahren zur Energieverbrauchsoptimierung ganzer Industriebetriebe entwickelt. Der methodische Ansatz basiert auf einer Untergliederung der Energieversorgungs- und Anwendungstechnik eines Betriebes in häufig auftretende und mathematisch darstellbare Einheiten (Module). Das Verfahren ermöglicht die Berechnung des meist komplexen Energieflusses innerhalb des Betriebes aus den Produktionsdaten und der Abfolge der Module. Über eine Variation der Produktionsdaten, modulinterner Parameter und der Anzahl oder Verschaltung der Module, ist der Einfluss der jeweiligen Variation auf den Energieverbrauch des Betriebes wesentlich schneller als bisher ermittelbar.

Abstract

This paper presents the first computer-aided procedure developed to optimize energy consumption for an entire industrial plant. The methodological approach is based on subdividing energy supply and utilization technologies of a plant into frequently occurring, mathematically expressed units (modules). The procedure makes calculating complex energy flows within the plant from the production data and the sequence of the modules possible. Using variations in production data, parameters within the modules, and the number and circuits of the modules, the influence of the respective variations on the energy consumption of the plant can be determined much more quickly than previously possible.

Inhaltsverzeichnis

Überblick und Zusammenfassung	1
1 Einführung in die Problemstellung	4
1.1 Geringe Relevanz der Energiekosten in Industriebetrieben	4
1.2 Ergebnisse konventioneller Energiekonzepterstellung.....	5
2 Entwicklung eines computergestützten Verfahrens	7
2.1 Grundlagen	7
2.2 Pflichtenheft	8
2.3 Gesamtdarstellung des entwickelten Verfahrens	9
2.3.1 Kurzdarstellung des Ablaufs und der wesentlichen Inhalte	9
2.3.2 Ablaufdiagramm	11
2.4 Theorie eines computergestützten Modells zur modularen Darstellung eines Betriebes	14
2.4.1 Grundidee.....	14
2.4.2 Entwicklung einiger grundlegender Module	14
2.4.3 Kurzdarstellung der wesentlichen Module.....	19
2.4.4 Modulrechenprogramm.....	27
2.4.4.1 Abbildung der Struktur des untersuchten Betriebes	28
2.4.4.2 Intervallzeit und Betrachtungszeitraum	29
2.4.4.3 Ablaufsteuerung des Rechenvorgangs	29
2.4.4.4 Dateneingabe und Datenvergleich.....	31
2.4.4.5 Unterstützung bei der Energiebedarfsoptimierung	33
2.4.4.6 Grafische Darstellungen	33
2.5 Quellen-Senken-Verknüpfungsprogramm.....	34
2.5.1 Grundgedanke.....	34
2.5.2 Verwendete Gleichungen für die Wärmeübertragung durch Wärmeübertrager	34
2.5.2.1 Elementare Wärmeübertragergleichungen	34
2.5.2.2 Berechnung des wirtschaftlichen Optimums	38
2.5.3 Programmtechnische Ausgestaltung	40
2.6 Rechenbeispiel.....	42
3 Vergleich mit konventionellen Verfahren und Fehlerrechnung	51
3.1 Übliche Datenbasis.....	51
3.2 Vergleich mit der konventionellen Erstellung eines Energiekonzeptes.....	52
3.3 Fehlerbetrachtung	53
3.3.1 Fehlermöglichkeiten über die Mittelwertbildung	54
3.3.2 Fehlermöglichkeiten durch das Vernachlässigen von Anfahrvorgängen	57
3.4 Überlegungen zur möglichen Genauigkeit bei der Betrachtung bzw. energetischen Einschätzung einzelner Anlagen oder Betriebe	59

4	Betriebsanalysen und Ergebnisse	61
4.1	Herstellung von Kalksandsteinen.....	61
4.1.1	Betriebsablauf.....	61
4.1.2	Beschreibung der energetisch relevanten Anlagen und Stoffströme	62
4.1.3	Ergebnisse des Wärmenutzungskonzeptes	63
4.1.4	Modularisierung des Kalksandsteinwerkes	64
4.1.5	Anwendung des Quellen-Senken-Verknüpfungsprogramms auf das Kalksandsteinwerk.....	67
4.1.5.1	Betriebsstufe 2 bei vorhandener Wärmerückgewinnung	68
4.1.5.2	Betriebsstufe 2 ohne vorhandene Wärmerückgewinnung	70
4.1.5.3	Optimierung der Wärmerückgewinnung für Betriebsstufe 3	72
4.1.6	Fazit Kalksandsteinwerk	74
4.2	Wärmerückgewinnung aus der Kondensationswärme	76
4.2.1	Vorüberlegungen	76
4.2.2	Trockneroptimierung.....	78
4.2.3	Backofenoptimierung	81
4.2.3.1	Darstellung der gewählten Wärmerückgewinnung	81
4.2.3.2	Auslegung der Komponenten	85
4.2.3.3	Betriebsergebnisse.....	86
4.2.3.4	Betriebswirtschaftliche Ergebnisse	89
4.2.3.5	Vergleich mit anderen Ofensystemen	94
4.2.3.6	Änderung der Wärmerückgewinnung.....	94
4.3	Optimierung eines größeren Betriebes in mehreren Schritten	96
4.3.1	Optimierung eines Lackrockners.....	96
4.3.2	Optimierung der Lackierhalle	101
4.3.3	Optimierung der zentralen Energieversorgung.....	102
5	Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	107
	Quellenverzeichnis	110

Überblick und Zusammenfassung

Ziel der Arbeit

Es ist zu erwarten, dass in Industriebetrieben der Anteil der Energiekosten an den gesamten Produktionskosten weiter auf sehr niedrigem Niveau bleiben wird. Dieser Umstand und andere Gründe reduzieren die Bereitschaft und das Vermögen der Betriebsleitung, sich fachkompetent mit einem rationelleren Energieeinsatz zu befassen. In dieser Arbeit wird aufgezeigt, ob und wie durch eine computergestützte Betrachtung der innerbetrieblichen Energieversorgung und der sich bietenden Energiebedarfsrationalisierungsmöglichkeiten die notwendige Bearbeitungszeit für die Konzepterstellung reduziert und somit ein relevanter Kostenanreiz zur Energierationalisierung geschaffen werden kann. Hierbei werden folgende Schwerpunkte gesetzt:

- Erarbeitung der Grundlagen und notwendigen Abläufe eines computergestützten Verfahrens zur Darstellung der innerbetrieblichen Energieversorgung und zur energetischen Optimierung eines Betriebes oder einzelner Verfahren und Anlagen (Kapitel 2)
- Vergleich der Möglichkeiten des computergestützten Verfahrens mit den Möglichkeiten der konventionellen Verfahren (Kapitel 3)
- Aufzeigen der Möglichkeiten und Grenzen des computergestützten Verfahrens durch Beispiele (Kapitel 4)

Es kann jedoch nicht Ziel dieser Arbeit sein, mit einem Computerprogramm fundiertes Fachwissen und umfangreiche praktische Erfahrung zu ersetzen.

Konkretes Vorgehen bei der Erarbeitung des computergestützten Verfahrens

Aus den Erfahrungen heraus, die bei der Bearbeitung vieler konventionell erstellter Energiekonzepte gewonnen wurden, entstand ein umfangreiches Pflichtenheft, dem das computergestützte Verfahren nach Möglichkeit gerecht werden sollte.

Die wesentlichen Eckpunkte dieses Pflichtenheftes sind im Folgenden aufgeführt:

- Modularisierung: Unterteilung des Betriebes oder einzelner Anlagen in kleine, möglichst einfach mathematisch darstellbare Einheiten (Module)
- flexible Dateneingabe: Alle verfügbaren Daten müssen genutzt werden können, fehlende Daten dürfen ein Weiterarbeiten nicht grundsätzlich unmöglich machen
- Reproduzierbarkeit: Ergebnisse müssen jederzeit reproduzierbar sein und dürfen der Qualität von Ergebnissen konventioneller Energiekonzepte nicht nachstehen
- hohe Flexibilität: Die erstellten Konzepte müssen schnell an neue Anforderungen anpassbar sein, die Berücksichtigung neuer Prognosen muss in kurzer Zeit möglich sein, ebenso wie die Durchführung von Worst-case-Analysen

Aus dem in Kapitel 2.2 ausführlicher dargestellten Pflichtenheft wurde eine Programmstruktur entwickelt. Sie besteht im Wesentlichen aus einem zentralen Ablaufsteuerungsprogramm, dem diverse Hilfsprogramme zugeordnet sind. Bereits parallel zur Entwicklung der Programmstruktur erfolgte die Programmierung einzelner, aus energietechnischem Blickwinkel nicht trivialer Komponenten des Programmpaketes, wie z. B.:

- das Ablaufsteuerungsprogramm in sehr vereinfachter Form
- das Quellen-Senken-Verknüpfungsprogramm
- einzelne Module

Komponenten des Programmpaketes, die keine grundlegende sachliche Auseinandersetzung mit energietechnischer Materie erforderten, wurden nicht programmtechnisch umgesetzt (z. B. die automatische grafische Darstellung verschiedenster Ergebnisse und Energiebilanzen). Sie werden in dieser Arbeit als reine Anregungen, für eine eventuelle spätere praktische Umsetzung des gesamten Programmpaketes, aufgeführt.

Die Belastbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse wurde - zum Teil bereits an zu erstellenden Energiekonzepten - mehrheitlich jedoch an bereits abgeschlossenen Energiekonzepten getestet.

Ergebnisse

Mit dieser Arbeit konnten die wesentlichen Punkte eines computergestützten Verfahrens erarbeitet und in der Praxis getestet werden. Bei allen Versuchen erwiesen sich die problemlose Berücksichtigung aller über einen Betriebsablauf vorliegenden Daten und die Flexibilität des Verfahrens bei jeglicher nachträglicher Änderung und zusätzlicher Betrachtung als besonders vorteilhaft.

Im Rahmen dieser Arbeit und anderer Arbeiten des Autors ergaben sich eine Reihe von Beobachtungen und Schlussfolgerungen, die auf einer Datenbasis von ca. 30 Industriebetrieben aufbauen und daher nur vorsichtig verallgemeinert werden dürfen.

Beobachtungen:

- Bei bestehenden Anlagen sind, bei den derzeitigen Energiepreisen, nur sehr selten technische Maßnahmen eines rationelleren Energieeinsatzes zu finden, deren Kapitalrückflusszeiten unter 2-3 Jahren liegen. Dies gilt jedoch nicht für organisatorische Maßnahmen wie Leerlaufvermeidung und bessere Auslastung der Anlagen.
- Deutlich mehr technische Maßnahmen eines rationelleren Energieeinsatzes mit Kapitalrückflusszeiten unter 2-3 Jahren sind bei Anlagen zu finden, die neu erstellt oder grundlegend überholt werden. Allerdings neigen viele Betreiber dazu, an neue Einsparmöglichkeiten nur sehr vorsichtig heranzugehen bzw. beim Althergebrachten zu bleiben.
- Maßnahmen, deren Kapitalrückflusszeiten bei über 2-3 Jahren liegen, wurden und werden in der Industrie nur selten realisiert. Daher könnten mit Kapitalrückflusszeiten von über 3, vor allem über 5 Jahren noch ganz erhebliche Einsparpotenziale realisiert werden.
- Anlagen zur Energiebedarfsdeckung und auch Produktionsanlagen sind meist wesentlich länger in Betrieb, als oft angenommen, meist deutlich mehr als 10, oft sogar über 20 Jahre.

Schlussfolgerungen:

- Bei der Planung von Neuanlagen und der grundlegenden Überholung alter Anlagen sollte verstärkt auf einen rationelleren Energieeinsatz geachtet werden.

- Hierbei kann es sich durchaus lohnen, bisher im Betrieb nicht umgesetzte Möglichkeiten zu betrachten, wie z. B. die Verbrennungsluftvorwärmung.
- Wegen der langen Standzeiten der Anlagen sollte man sich bei der Entscheidungsfindung nicht nur auf die Kapitalrückflusszeiten stützen, sondern auch Kapitalwertbetrachtungen durchführen. Dies könnte in verschiedenen Fällen durchaus zu einer Entscheidung für Maßnahmen mit längeren Kapitalrückflusszeiten führen.

Quervergleich mit anderen Verfahren

Eine Literaturrecherche hat Hinweise auf verschiedene Verfahren und Vorgehensweisen gebracht, die im Ansatz eine ähnliche Zielrichtung verfolgen wie diese Arbeit:

- **Omnium-Verfahren /3/**
Bei diesem Verfahren zur Optimierung der Abwärmenutzung werden verschiedene Abwärmequellen mit mehreren möglichen Wärmeverbrauchern bestmöglich verbunden. Der zeitliche Verlauf von Abwärmeeinfall und Wärmebedarf wird berücksichtigt. Das Verfahren weist Parallelen zu dem in Kapitel 2.5 beschriebenen und im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Quellen-Senken-Verknüpfungsprogramm auf. Die Entwicklung der beiden Verfahren dürfte weitgehend zeitgleich erfolgt sein.
- **Erweitertes Omnium-Verfahren /4/**
Das neue Verfahren basiert auf den Algorithmen des Omnium-Verfahrens und beschränkt sich weiterhin auf die Verknüpfung von Abwärmequellen mit möglichen Wärmeverbrauchern. Durch die vorgenommenen Erweiterungen ist es möglich, Stoffströme mehrmals zu verschalten, die exergetisch sinnvollste Kombination auszuwählen und den Einsatz von Wärmespeichern zu prüfen.
- **Pinch-Point-Analyse /5/ /7/**
Die Wärmeintegrationsanalyse oder auch Pinch-Point-Analyse wurde als Instrument der Prozessoptimierung in der chemischen Industrie entwickelt und bereits in allen Branchen mit kontinuierlichem Prozessablauf erfolgreich eingesetzt. Das Verfahren beschränkt sich auf die optimale Verknüpfung von aufzuwärmenden und abzukühlenden Stoffströmen an Hand eines Wärmeübertragernetzwerkes. Es erfolgt hierbei keine Beschränkung auf Abwärmeströme.

Alle diese Analysemethoden stellen keine Alternative zu dem hier vorgestellten Verfahren dar und können nur in Teilbereichen ähnliche Ergebnisse liefern. Das hier vorgestellte Verfahren hat, gegenüber den oben beschriebenen Analysemethoden, folgende Vorteile:

- die Erfassung des gesamten Betriebes und Produktionsablaufs sowie Betrachtung aller Einsparmöglichkeiten, und nicht nur der rationellen Nutzung von Abwärmeströmen bzw. Wärmeströmen generell
- die Möglichkeit, verschiedene Szenarien betrachten zu können (z. B. unterschiedliche Produktions- oder Energiepreisentwicklungen), um damit die zu erwartende zukünftige Energieverbrauchsentwicklung in der gesamten möglichen Bandbreite zu erfassen

1 Einführung in die Problemstellung

1.1 Geringe Relevanz der Energiekosten in Industriebetrieben

Analysiert man den bisherigen Verlauf des Anteils der Energiekosten im verarbeitenden Gewerbe am gesamten Bruttoproduktionswert, erhält man die in Bild 1.1-1 dargestellte, weitgehend stetige Abnahme von 3,3 % für 1981 auf 1,7 % für 1998. /2/

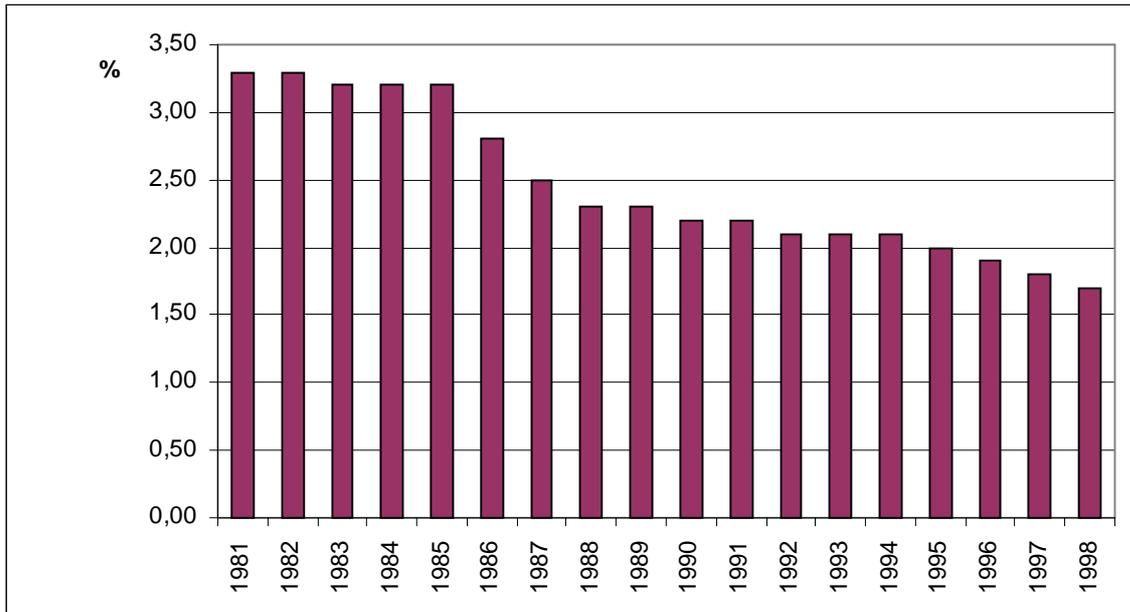


Bild 1.1-1: Anteil der Energiekosten im verarbeitenden Gewerbe in Prozent des Bruttoproduktionswertes. Zahlenwerte ab 1992 inkl. neue Bundesländer /2/.

Die Gründe für diese Abnahme um annähernd 50 % sind vielfältig:

- Abnahme des spezifischen Endenergieeinsatz im verarbeitenden Gewerbe, überwiegend aus folgenden Gründen:
 - Strukturwandel: Verlagerung der Produktion von energieintensiven Produkten auf weniger energieintensive
 - Effizienzsteigerung im Rahmen der Ersatzbeschaffung von Maschinen und Anlagen
 - konkrete Maßnahmen eines rationelleren Energieeinsatzes
- Abnahme der inflationsbereinigten Energiepreise für Öl und Gas. Beispielsweise lag das inflationsbereinigte Preisniveau für Erdgas für Industrieabnehmer 1998 unter dem Niveau von 1976 /1/

Die bisherige Tendenz bei der Entwicklung des Anteils der Energiekosten am Bruttoproduktionswert lässt auf eine weitere, wenn auch nur leichte, Abnahme schließen. Dem stehen Unsicherheiten bei der zukünftigen Energiepreisentwicklung entgegen, die eher auf ein langfristig höheres Preisniveau und damit steigendem Anteil der Energiekosten schließen lassen. Es wird eine Stagnation des Anteils der Energiekosten am Bruttoproduktionswert auf niedrigem Niveau, zumindest für die nächsten 10 Jahre, erwartet.

1.2 Ergebnisse konventioneller Energiekonzepterstellung

Energiefragen werden in Industriebetrieben von sehr unterschiedlich ausgebildeten Personen mit verschiedenen Methoden, Handlungsspielräumen und Interessen angegangen. Entsprechend grundlegend unterscheiden sich oft die Ergebnisse der Bemühungen.

Der Bereich, in dem die Betriebe bei der Energierationalisierung agieren, ist sehr breit. Bei Aktionen, die unter den Begriffen „Energieverbrauchsoptimierung“, „Energiekostensenkung“ oder „Energieeinsparung“ laufen, werden verschiedenste konzeptionelle Ansätze verwendet:

Ohne konkretes Konzept:

Eine Energieverbrauchsreduzierung erfolgt, wenn überhaupt, über beabsichtigte oder auch unbeabsichtigte Mitnahmeeffekte im Rahmen notwendiger Beschaffungsmaßnahmen bei der Erneuerung oder Überholung einzelner Anlagen oder Betriebsteile.

Teilkonzepte:

Es erfolgt eine bewusste Beschränkung der Überlegungen zur Energieverbrauchsoptimierung auf Teilbereiche des gesamten Betriebs oder Teilaspekte wie z. B.:

- zentrale Energieversorgung
- die energieintensivsten Bereiche des Betriebes
- einzelne Energieträger

Fundierte Konzepterstellung für den gesamten Betrieb:

Im Idealfall erfolgt eine Konzepterstellung für den gesamten Betrieb nach VDI-Richtlinie 3922 und den Arbeiten von Schaefer /6/. Bei kontinuierlichen Prozessen sollte zusätzlich eine Pinch-Point-Analyse /7/ durchgeführt werden.

Ein Verzicht auf ein fundiertes Energiekonzept kann, unabhängig davon, ob der Verzicht aus Unvermögen oder gezielt (meist aus Gründen der Zeit- und Kostenersparnis) erfolgt, mit erheblichen Folgekosten verbunden sein; das wirtschaftliche und energetische Optimum bei Anlagen zur Energieversorgung wird ohne Energiekonzept sicher nicht erreicht. Hierzu ein Beispiel: Eine Aluminiumgießerei muss, um den Vorschriften des BImSchG zu genügen, die Rauchgase ihrer drei Schmelzöfen reinigen. Die durch die TA Luft vorgeschriebenen Grenzwerte sind bezüglich zulässigem Staubgehalt so niedrig, dass sie nur unter Verwendung von Tuchfiltern eingehalten werden können. Für diese ist eine maximale Rauchgastemperatur von 120 °C zulässig. Daher müssen die Rauchgase mit im Mittel 600 °C auf 100 °C abgekühlt werden, bevor sie in den Tuchfilter gelangen dürfen. Das Problem der Abkühlung wurde werksintern ohne weitere Überlegungen wie folgt gelöst: Über einen Wärmeübertrager werden die Rauchgase abgekühlt. Zur Kühlung wird Umgebungsluft verwendet, die nach einer Temperaturerhöhung von 20 K an die Umgebung abgegeben wird. Dieser Wärmeübertrager, der keinerlei Energieverbrauchsreduzierung und damit auch keine Kosteneinsparung erbringt, kostete etwas über eine Million DM. Es wurden die auf der Hand liegenden Alternativen wie weitergehende Verbrennungsluftvorwärmung, Fernwärmeauskopplung oder Abwärmeverstromung nicht untersucht. Diese Maßnahmen hätten den Kühler weitgehend überflüssig gemacht und

befinden sich, wie eine spätere Untersuchung gezeigt hat, knapp im unrentablen Bereich. Hätte man den Maßnahmen jedoch die Investition für den vermiedenen Kühler gutgeschrieben, wäre man leicht in den wirtschaftlichen Bereich gekommen.

Ein weiteres Problem ist die nur bedingt vorhandene Flexibilität eines einmal erstellten Konzeptes (auch eines sehr guten). Flexibilität herrscht nur im Rahmen der bei der Bearbeitung berücksichtigten Varianten und der eventuell gegebenen Interpolationsmöglichkeiten. Eine nachträgliche Berücksichtigung der folgenden Punkte ist oft schwierig:

- Einarbeitung nachgeholter Messungen bzw. neuer Informationen und Erkenntnisse
- Berücksichtigung von Änderungen in der Produktionsmenge und Produktpalette
- Berücksichtigung neuer Ideen, Fertigungstechniken oder Fortschritte in der Produktions- und Anlagentechnik
- Durchführung von Worst-case-Analysen
- Optimierungsversuche
- Berücksichtigung von Problemen, die erst beim Detailengineering beschlossener Maßnahmen bemerkt werden

Eine Einarbeitung neuer Ideen und Erkenntnisse ist kurz nach der Erstellung des Energiekonzeptes bereits aufwändig, eine spätere Fortschreibung entspricht bezüglich des Zeitaufwands (und damit auch der Kosten) praktisch einer Neubearbeitung.

Ein zusätzliches Problem, auf das hier nur kurz hingewiesen wird, stellt die vielen Energiekonzepten zu Grunde liegende, relativ schmale Datenbasis dar sowie deren oftmalige Verarbeitung als pauschale Mittelwerte. Hierdurch werden zum Teil ganz erhebliche Fehler in Kauf genommen. Eine detaillierte Betrachtung dieser Problematik erfolgt in Kapitel 3.

2 Entwicklung eines computergestützten Verfahrens

2.1 Grundlagen

In Kapitel 1 wurde bereits eine Einführung in die Problemstellung gegeben. Im Folgenden werden die wesentlichen Punkte nochmals aufgeführt:

- Im deutschen Durchschnittsbetrieb ist der Anteil der Energiekosten am gesamten Bruttoproduktionswert sehr gering und damit auch die Bedeutung der Energiekosten für das wirtschaftliche Gesamtergebnis
- Aus Zeit- und Kostengründen werden selten fundierte Energiekonzepte erstellt, d. h. solche, die über ein reines Erzeugen, Verteilen und Verbrauchen von Energie hinausgehen
- Konventionelle Energiekonzepte weisen oft mangelnde Flexibilität in Bezug auf eine Anpassung der Ergebnisse des Konzeptes an unerwartete Entwicklungen auf
- Die Basis der innerbetrieblich erfassten und verarbeiteten Energiedaten ist oft sehr schmal. Vorhandene Daten werden zum Teil bei energiebezogenen Überlegungen ungenügend berücksichtigt

Betrachtet man die Sachlage nach rein monetären Gesichtspunkten, stößt man auf folgende Probleme:

1. Die Erstellung und Fortführung eines fundierten Energiekonzeptes ist kostenintensiv und vordergründig ohne direkten Kapitalrückfluss. Ob Projekte eines rationelleren Energieeinsatzes mit Alternativprojekten konkurrieren könnten, kann ohne fundiertes Energiekonzept schwer beurteilt werden.
2. Das in den Betrieben verfügbare Kapital wird meist streng nach Rentabilitätskriterien eingesetzt. Außerdem müssen an erster Stelle die folgenden Bereiche abgedeckt werden:
 - Erhalt der Produktionserlaubnis (behördliche Auflagen, Sicherheitsaspekte, Arbeitssicherheit, Umweltschutzauflagen)
 - Erhalt der Produktivität (Erneuerung und Instandhaltung von Produktions- und Nebenanlagen, Qualitätssicherung)
 - Zukunftssicherung (Produktentwicklung, Weiterentwicklungen in der Fertigungstechnik)

Um die verbleibenden Mittel konkurrieren Investitionsvorhaben aus verschiedensten Bereichen. Die Entscheidungsträger neigen zu Projekten aus ihren eigenen Fachgebieten. Dies sind oft der anlagen- oder produkttechnische und der kaufmännische Bereich, selten die Energietechnik.

So stichhaltig obige Argumente aus Punkt 1 und 2 auch sein mögen, so ungerechtfertigt ist das daraus oft resultierende Schattendasein des rationellen Energieeinsatzes. Denn gerade beim Neubau oder einer Generalüberholung einzelner Produktionsanlagen oder Anlagen der zentralen Energieversorgung kann durch ein begleitendes Energiekonzept,

mit oft nur wenig Zusatzaufwand, erheblich an den Energiekosten und damit auch langfristig an den Produktionskosten gespart werden.

Um die Nachfrage nach fundierten Energiekonzepten zu verstärken, werden drei wesentliche Ansatzpunkte gesehen:

- nachhaltige Energiepreiserhöhungen (nicht Intention dieser Arbeit)
- gesetzliche Vorschriften (wurde mit der letztlich nicht realisierten Wärmenutzungsverordnung versucht; ebenfalls nicht Intention dieser Arbeit)
- Entwicklung eines Verfahrens für eine schnellere und kostengünstigere Erstellung und Aktualisierung fundierter Energiekonzepte

2.2 Pflichtenheft

Vorgaben, die sich aus kaufmännischen Belangen ergeben:

- Das Verfahren sollte nach Möglichkeit bereits bei der Ersterstellung eines Energiekonzeptes helfen, die Kosten für das Konzept zu reduzieren
- Das Verfahren muss in jedem Fall die Kosten einer weiteren Bearbeitung des Energiekonzeptes (Aktualisierung, Betrachtung weiterer Varianten, usw.) erheblich reduzieren
- Die mit dem Verfahren gewonnenen Ergebnisse müssen eine verlässliche Grundlage für die Entscheidungen über das weitere Vorgehen und ein eventuelles kostenintensives Detailengineering bieten
- Basiert die Erstellung des Konzeptes zum Teil auf unsicheren Annahmen (z. B. bezüglich der Energiepreisentwicklung oder der zukünftigen Absatzentwicklung eines Produktes und damit der Einsatzdauer einzelner Anlagen) muss eine Sensitivitätsanalyse möglich sein

Vorgaben, die sich aus energiewirtschaftlichen Belangen ergeben:

- Mit dem Verfahren muss ein Energiekonzept erarbeitbar sein, welches in der Qualität einem konventionellen Energiekonzept nicht nachsteht
- Es muss eine gekoppelte Betrachtung aller in Zusammenhang stehender Systeme mit energetischer Relevanz möglich sein
- Die Betrachtung sowohl von Qualität als auch von Quantität der eingesetzten Energieströme muss möglich sein
- Die energetische Darstellung des Betriebes muss an Hand von Datenmaterial aus der Vergangenheit überprüfbar sein, an Hand der zukünftigen Produktionsdaten müssen die daraus folgenden, zukünftigen Energieströme ermittelbar sein
- Es muss sowohl eine detaillierte Betrachtung schnell ablaufender Vorgänge als auch eine Betrachtung sehr langsam ablaufender Vorgänge möglich sein
- Es muss abschätzbar sein, ob durch den Einbau eines Speichers die Ausnutzung verschiedener Energieströme verbessert werden kann. Kommt ein Speicher infrage, muss er energetisch und wirtschaftlich optimiert werden können

- Verbleiben Abwärmequellen und potenzielle Abwärmesenken, so muss ihre Verknüpfbarkeit unter energetischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten schnell überprüft werden können
- Mit dem Verfahren sollten, bei bestehenden oder geplanten energietechnischen Systemen, schnell die Einsparpotenziale möglicher Varianten getestet werden können
- Das Verfahren muss zuverlässige und reproduzierbare Ergebnisse liefern
- Vorteilhaft, aber nicht zwingend notwendig, wäre außerdem eine automatische grafische Aufbereitung der Zwischenschritte und Ergebnisse, beispielsweise als Energieflussbilder, Jahresdauerlinien u. Ä.

Vorgaben, die sich aus dem betrieblichen Alltag ergeben:

- Da jeder Betrieb individuelle Strukturen aufweist, sollte das Verfahren bei der Darstellung der energetischen Abläufe auf kleine, möglichst einfach mathematisch darstellbare Einheiten aufbauen, die sich auch in verschiedenen Anlagen oder Betrieben häufig wiederfinden
- Das Verfahren muss fundierte Schnellabschätzungen zulassen
- Die erstellten Konzepte müssen schnell an neue Anforderungen anpassbar sein, die Berücksichtigung neuer Prognosen muss in kurzer Zeit möglich sein, ebenso wie die Durchführung von Worst-case-Analysen
- Daten müssen in sehr unterschiedlicher Form und Qualität genutzt bzw. ausgewertet werden können
- Das Hilfsmittel muss die Abschätzung fehlender Daten unterstützen. Die getroffenen Annahmen müssen überprüft werden können

2.3 Gesamtdarstellung des entwickelten Verfahrens

Zum besseren Verständnis der Kapitel 2.4 und 2.5 und unter Vorwegnahme der im Folgenden schrittweise entwickelten Grundsätze wird in Kapitel 2.3 das gesamte computergestützte Verfahren in seinen wesentlichen Punkten vorgestellt.

2.3.1 Kurzdarstellung des Ablaufs und der wesentlichen Inhalte

Die Erstellung eines Energiekonzeptes mit Rechnerunterstützung erfolgt in mehreren Schritten.

Schritt 1: Ermittlung des energetischen Status quo

Die energetischen Abläufe innerhalb eines Betriebes werden mit Hilfe kleiner, miteinander verknüpfter Einheiten (Module) abgebildet.

Diese Module beinhalten die Rechenvorschriften, an Hand derer aus bekannten Eingangsgrößen die noch unbekanntes Ausgangsgrößen berechnet werden können.

Bei den Eingangsgrößen handelt es sich um Energiedaten aus vorgeschalteten Modulen oder um vorgegebene Produktionsdaten.

Mithilfe eines übergeordneten Modulrechenprogramms kann aus den Produktionsdaten und der modularen Abbildung des Betriebes der Energiefluss innerhalb des Betriebes berechnet werden.

An Hand von Datensätzen aus der Vergangenheit kann die Genauigkeit der Abbildung überprüft und gegebenenfalls verbessert werden.

Am Ende des ersten Schrittes existiert ein überprüftes energetisches Modell des zu untersuchenden Betriebes.

Schritt 2: Betrachtung der zukünftigen Entwicklung des Energieeinsatzes und der Möglichkeiten eines rationelleren Energieeinsatzes:

Das im ersten Schritt gewonnene Modell kann herangezogen werden, um die energetischen Auswirkungen geänderter Produktionsdaten, angedachter Änderungen der Anlagen oder Maßnahmen eines rationelleren Energieeinsatzes zu ermitteln.

Das Modulrechenprogramm bietet außerdem Hilfsmittel zur Identifizierung von Möglichkeiten eines rationelleren Energieeinsatzes. Beispielsweise kann die Abhängigkeit von Zwischen- oder Endergebnissen von bis zu drei Parametern ausgetestet werden.

Die Verknüpfung verbleibender Abwärmequellen mit potenziellen Wärmesenken und die Berechnung der damit verbundenen monetären und energetischen Einsparmöglichkeiten erfolgt durch ein ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit entwickeltes Quellen-Senken-Verknüpfungsprogramm.

Schritt 3: Berichterstattung

Zur Berichterstattung liegen die folgenden Informationen vor, als Stundenmittelwerte über ein Jahr oder als Maximal- und Durchschnittsleistungen:

- Energiebedarf des Betriebes und
- Energieflüsse innerhalb des Betriebes

jeweils getrennt nach den verschiedenen Energieträgern und für alle untersuchten Varianten und Einsparmöglichkeiten.

Mit obigen Daten liegen auch die Grundlagen für die Berechnung der wirtschaftlichen und energetischen Auswirkungen der Varianten und Einsparmöglichkeiten auf das Betriebsergebnis vor.

Außerdem ist eine automatische grafische Aufbereitung ausgewählter Ergebnisse möglich.

2.3.2 Ablaufdiagramm

Bild 2.3-1 zeigt eine Übersicht des gesamten Programmpaketes, welches im Folgenden kurz erläutert wird. In Klammern ist angegeben, in welchem Kapitel nähere Informationen zum jeweiligen Stichwort zu finden sind. Die in Bild 2.3-1 wiederzufindenden Bezeichnungen sind kursiv gedruckt.

Modulrechenprogramm (2.4.4):

Als erster wesentlicher Schritt erfolgt die *modulare Abbildung des Betriebes* (Module 2.4.2 und 2.4.3, ansonsten 2.4.4.1) oder des zu betrachtenden Vorganges. Bei der Auswahl und Gestaltung der einzelnen Module unterstützt das *Hilfsprogramm zur Erstellung der Module*. Es folgt die *Festlegung von Intervallzeit und Betrachtungszeitraum* (2.4.4.2). Parallel zu diesem Schritt müssen die entsprechenden Daten in das *Hilfsprogramm zur Erstellung der Produktionsdatei* und in das *Hilfsprogramm zur Erstellung der Bedarfsdatei* eingegeben werden, damit für den *Start der Berechnung* (2.4.4.3) alle notwendigen Daten vorliegen. Das Programm führt, basierend auf den Informationen aus der modularen Abbildung, die *Generierung der Datenblätter* (2.4.4.3) durch.

Es folgt die *Berechnung und Speicherung der Ergebnisse* (2.4.4.3) für das erste Intervall und die erste Parametervariation. Dies wird wiederholt, bis alle Intervalle und alle veränderlichen Parameter in der angegebenen Variationsbreite und Schrittfolge abgearbeitet sind.

Komplexe Rechenschritte werden hierbei an externe *Hilfsprogramme zur Berechnung* übergeben. Bei der Berechnung werden Informationen zur Temperatur am jeweiligen Aufstellungsort aus dem *Hilfsprogramm Temperaturverlauf Aufstellungsort* abgerufen. Die Berechnungen werden mit der *Speicherung und Ausgabe Gesamtergebnis* abgeschlossen. Es liegen dann, über den gesamten Betrachtungszeitraum für jedes Intervall und für jede Variation der Parameter, die Daten zu allen relevanten Energie- und Massenströmen vor.

Das Programm schließt ab mit der *Aufstellung der Checklisten* (2.4.4.5) und der *grafischen Aufbereitung* der Ergebnisse (2.4.4.6).

Hilfsprogramm zur Erstellung der Produktionsdatei (2.4.4.3):

In der Produktionsdatei werden zu jedem Anwendungsmodul für jedes Intervall die Produktionsdaten gespeichert. Die für die *Generierung der Datenblätter* notwendigen Informationen folgen aus der modularen Darstellung des Betriebes, erstellt im Rahmen des Modulrechenprogramms. Die Dateneingabe erfolgt mithilfe einer für alle Programme einheitlichen *Einleseroutine* (2.4.4.4). Das Programm speichert die Daten und gibt sie bei Bedarf an das Modulrechenprogramm weiter.

Hilfsprogramm zur Erstellung der Bedarfsdatei (2.4.4.3):

Der Ablauf innerhalb dieses Hilfsprogramms ist identisch mit jenem des Hilfsprogramms zur Erstellung der Produktionsdatei. Abgespeichert werden alle Daten der Bedarfsdateien, d. h. die Startwerte für die Bedarfsmodule.

Hilfsprogramm zur Erstellung der Module (2.4.4.1):

In einem ersten Schritt erfolgt die *Auswahl aus der Modul-Bibliothek*, bei Bedarf folgt die *Anpassung einzelner Module* an die Gegebenheiten im untersuchten Betrieb mit der anschließenden *Abfrage der Modul-Parameter*, wie beispielsweise der Kesselspeisewassertemperatur. Liegen zu verschiedenen, voneinander abhängigen Größen mehrere Wertepaare oder gar Messreihen vor (z. B. Rauchgastemperatur, abhängig von der Kessellast) erfolgt die *Berechnung der Abhängigkeiten verschiedener Parameter* selbstständig vom Hilfsprogramm nach Eingabe der Wertepaare oder Messreihen.

Hilfsprogramm Datenvergleich (2.4.4.4):

Der Nutzer trifft die *Festlegung der zu vergleichenden Daten*. Die Eingabe der vorliegenden und zu vergleichenden Betriebsdaten erfolgt über die einheitliche *Einleseroutine*. Nach der Übernahme der berechneten Daten vom Modulrechenprogramm erfolgen durch das Hilfsprogramm der *Vergleich* (der eingelesenen mit den berechneten Daten) *und die Auswertung* sowie abschließend die *Ausgabe des Ergebnisses*.

Hilfsprogramm Temperaturverlauf Aufstellungsort (2.4.4.3):

Der Ablauf innerhalb dieses Hilfsprogramms ist identisch mit jenem des Hilfsprogramms zur Erstellung der Produktionsdatei. Abgespeichert werden die Temperaturverläufe aller bei der modularen Abbildung für jedes Modul festgelegten Aufstellungsorte. Alternativ zur Eingabe der Temperaturverläufe über die Eingaberoutine können auch bereits bestehende Temperaturverläufe verwendet werden.

Weitere Hilfsprogramme:

Das Modulrechenprogramm sollte auf verschiedenste auf dem Markt befindliche Hilfsprogramme zurückgreifen können, ebenso auf die von den Anlagenbauern auf Datenträgern angebotenen Hilfsmittel wie Kennlinienfelder usw.

Quellen-Senken-Verknüpfungsprogramm (2.5):

Die *Übernahme der Daten der Quellen und Senken* erfolgt direkt vom Modulrechenprogramm. Die Daten können aber auch (im Bild nicht dargestellt) über die Eingaberoutine direkt eingegeben werden. Das Programm fragt beim Nutzer die Parameter der zum Einsatz kommenden Wärmeübertrager, Wärmeträgermedien und Wärmespeicher ab. Es folgt die *Berechnung aller Quellen-Senken-Kombinationen*. Aus allen prinzipiellen Möglichkeiten wird bei der *Optimierung* die günstigste ausgewählt und als Ergebnis ausgegeben.

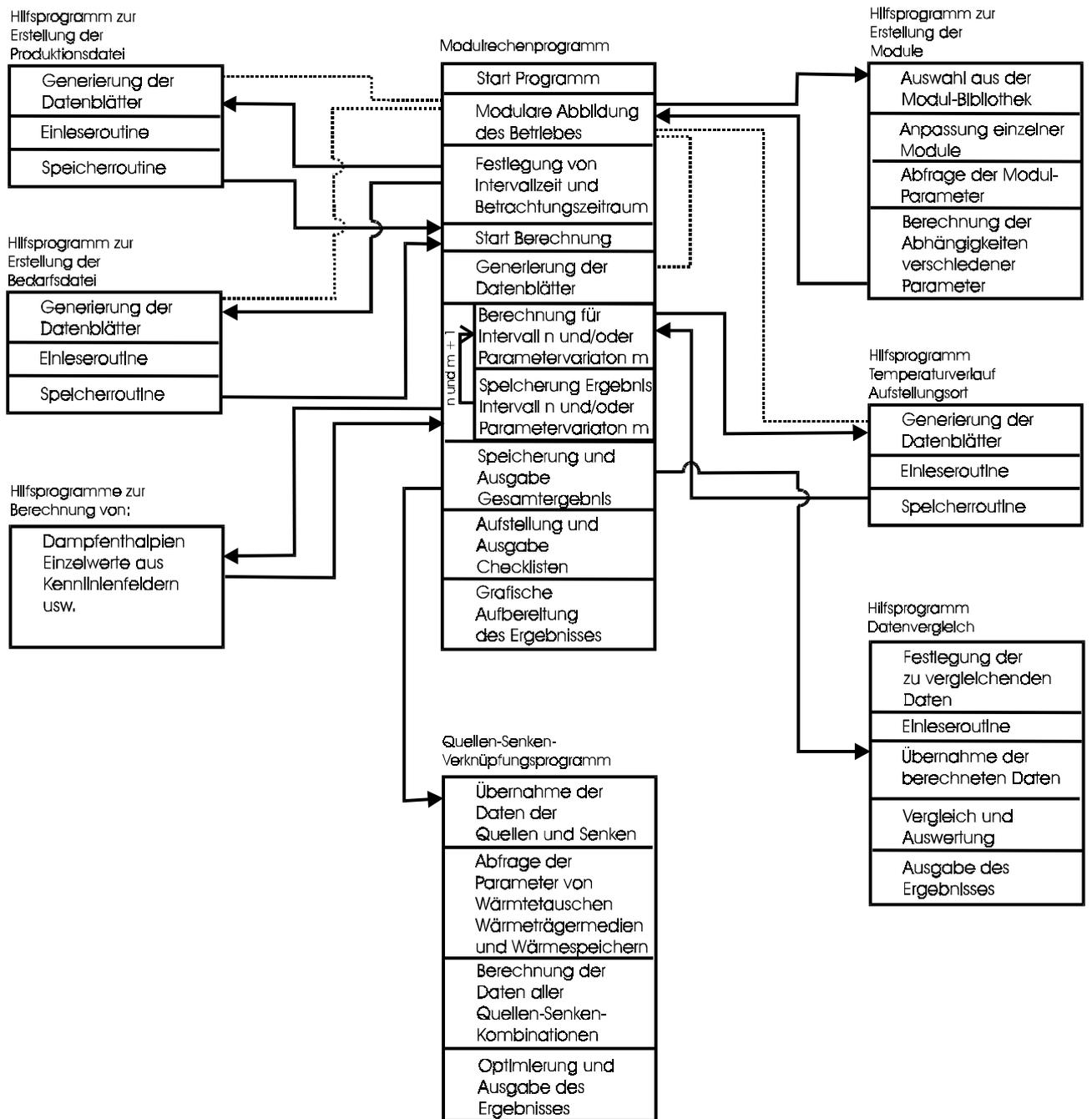


Bild 2.3-1: Übersicht des gesamten Programmpaketes

2.4 Theorie eines computergestützten Modells zur modularen Darstellung eines Betriebes

2.4.1 Grundidee

Die energetischen Zusammenhänge innerhalb eines Betriebes sind meist sehr komplex. Eine mathematische Beschreibung des gesamten Betriebes, mit der es möglich ist, aus der Produktionsmenge ohne weitere Zwischenschritte den daraus resultierenden Energiebedarf zu berechnen, ist nur für sehr einfach strukturierte Betriebe denkbar.

Bei dem hier entwickelten Modell besteht die Grundidee darin, einen Betrieb in kleine, möglichst oft wiederkehrende Einheiten aufzuteilen, deren Auswirkungen auf den Energieeinsatz relativ einfach zu beschreiben sind. Diese kleinen Einheiten werden im Folgenden Module genannt. Jedes Modul hat diverse Ein- und Ausgänge, die mit den wichtigsten Daten von Energie- und Massenströmen belegt werden können. Modulintern erfolgt die Berechnung fehlender Daten. Die Ein- und Ausgänge aller für eine Beschreibung eines Betriebes notwendigen Module werden, entsprechend den tatsächlichen Gegebenheiten im untersuchten Betrieb, verknüpft.

In Kapitel 2.4.2 werden einige grundlegende Module inklusive der modulinternen Rechenvorschriften entwickelt.

In Kapitel 2.4.3 erfolgt die Vorstellung aller im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Module.

Neben den einzelnen Modulen ist ein Rahmenprogramm notwendig, welches die folgenden Aufgaben übernimmt:

- Einlesen, Aufbereiten und Zuordnen aller vorliegender Daten
- Beachtung der Reihenfolge und der vorgegebenen Verknüpfungen bei der modulweisen Abarbeitung des Betriebes
- Abspeicherung von Zwischenergebnissen und des Endergebnisses
- Management von Hilfsprogrammen und Optimierungsrechnungen

Die Herleitung des Rahmenprogramms (Modulrechenprogramm) erfolgt in Kapitel 2.4.4.

2.4.2 Entwicklung einiger grundlegender Module

Einleitend wurde bereits ausgeführt, dass der Betrieb durch eine Abfolge von Modulen energetisch abgebildet werden soll. Die Module beschreiben einzelne, immer wieder vorkommende, den Energieverbrauch beeinflussende, einfache Vorgänge.

Vorerst kann man sich ein Modul als Black Box mit diversen Ein- und Ausgängen vorstellen. Mindestens ein Ein- oder Ausgang muss durch den Bearbeiter oder ein anderes Modul vorgegeben werden. Die restlichen Ein- und Ausgänge errechnen sich aus dem oder den bekannten Ein- oder Ausgängen. Die hierfür notwendigen Rechenvorschriften stellen den Inhalt der Black Box dar.

Es ist beabsichtigt, die Rechenvorschriften innerhalb eines Moduls auf möglichst ein-

fachem Niveau zu halten. Daraus folgt, dass nur stationäre Verhältnisse an den Ein- und Ausgängen eines Moduls betrachtet werden können.

Durch diese Forderung nach stationären Verhältnissen an den Ein- und Ausgängen ergeben sich zwangsläufig zwei weitere Vorgaben, auf die in 2.4.4 (Modulrechenprogramm) näher eingegangen wird, die aber, zum besseren Verständnis des Folgenden, bereits hier kurz aufgeführt sind:

- Bei nicht stationären Vorgängen (was dem Normalfall entspricht) muss der gesamte Vorgang in eine Abfolge stationärer Intervalle unterteilt werden. Für jedes dieser Intervalle muss das Modul separat eingesetzt werden
- Da sehr unterschiedliche Vorgänge betrachtet werden sollen, muss die Zeitdauer dieser konstanten Intervalle variabel sein

Die Ein- und Ausgänge eines Moduls müssen alle für eine energetische Beurteilung der Vorgänge notwendigen Informationen enthalten. Dies sind im Einzelnen:

- Massenkapazitätsstrom des Mediums
- Temperatur
- Feuchte
- Druck
- Angaben über chemisch gebundene Energie (Heiz- oder Brennwert)
- bei elektrischer Energie nur der Energieinhalt

Betrachtet werden nicht nur alle Energieströme, sondern auch Massenströme von Medien, die erwärmt werden müssen oder deren Erwärmung mit Abwärme zur Energieverbrauchsreduzierung beiträgt, wie z. B. die Verbrennungsluft.

Nach diesen theoretischen, einführenden Überlegungen soll im Folgenden ein einfaches Modul betrachtet werden. Hierbei handelt es sich um ein Wandlermodul entsprechend Bild 2.4-1, in diesem Fall um einen Dampferzeuger.

Die Ein- und Ausgänge des Wandlermoduls sind wie folgt belegt:

- Zugeführte Energie- und Massenströme werden von oben kommend dargestellt und mit E (Eingang) und einer fortlaufenden Nummer gekennzeichnet
- Abgeführte Energie- und Massenströme werden nach unten aus dem Modul herausgeführt, wenn sie gefasst und/oder weiter nutzbar vorliegen oder bereits genutzt werden. Gekennzeichnet werden sie mit A (Ausgang) und einer fortlaufenden Nummer
 - Genutzte nutzbare Energie- und Massenströme werden zum nächsten Modul geführt
 - Ungenutzte nutzbare Energie- und Massenströme werden nach rechts abknickend dargestellt
- Abgeführte Energie- und Massenströme werden seitlich aus dem Modul herausgeführt, wenn sie sicher nicht nutzbar sind. Die Kennzeichnung erfolgt mit V (Verlust) und ebenfalls mit einer fortlaufenden Nummer (besteht bezüglich der Verwendbarkeit der Energie- und Massenströme Zweifel, dann sollten sie nach unten herausgeführt werden)

Die Durchlaufrichtung der Energie- und Massenströme erfolgt von den Eingängen (E) zu den Ausgängen (A und V); die Berechnung der fehlenden Größen kann in beiden Richtungen erfolgen, meist von einem oder mehreren bekannten Ausgängen aus.

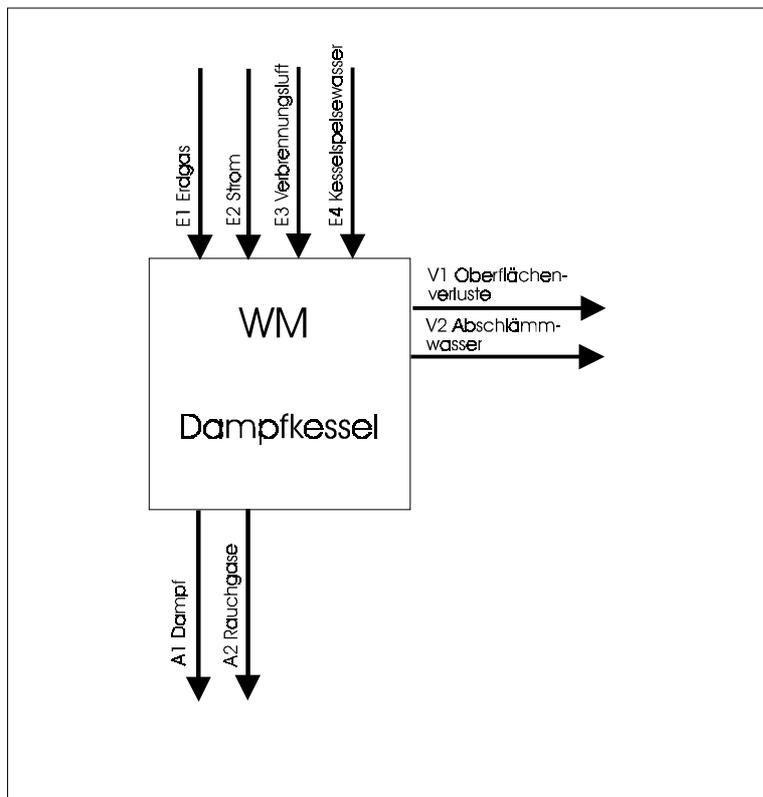


Bild 2.4-1: Einfaches Wandlermodul (WM)

Das hier vorgestellte Wandlermodul enthält die folgenden Ein- und Ausgänge:

Eingänge:

- zugeführte Energie (Erdgas) E1
- zugeführte Hilfsenergie (Strom) E2
- zugeführte Verbrennungsluft E3
- zugeführtes Kesselspeisewasser E4

Ausgänge:

- sicher nicht nutzbare Ausgänge:
 - diffuse Oberflächenverluste V1
 - Abschlammwasser V2
- sicher nutzbare Ausgänge:
 - Dampf A1
 - Rauchgase A2

Bezüglich der modulinternen Verknüpfung der Ein- und Ausgänge sei auf Kapitel 2.6 verwiesen.

Die bisherigen Überlegungen zum Wandlermodul sind auf einfache Feuerungen mit beliebigen Brennstoffen übertragbar. Es müssen nur die entsprechenden Kenngrößen

(Luftbedarf, Rauchgastemperatur, spezifisches Abgasvolumen usw.) geändert werden.

Zum besseren Verständnis wird nach der Entwicklung des ersten Moduls ein einfacher Fertigungsablauf betrachtet. Es handelt sich um die Herstellung von Kalksandsteinen in einer sehr vereinfachten Form entsprechend Bild 2.4-2.

Die Steinrohlinge werden in einem Härtekessel chargenweise je nach Steinabmessungen 6 bis 8 Stunden unter Dampfdruck und Dampfatmosfera gehärtet. Der hierzu notwendige Dampf wird mit 16 bar durch einen erdgasgefeuerten Dampfkessel bereitgestellt. Mit Hilfe des aus dem Härtekessel abfließenden Kondensats wird das Kesselspeisewasser vorgewärmt.

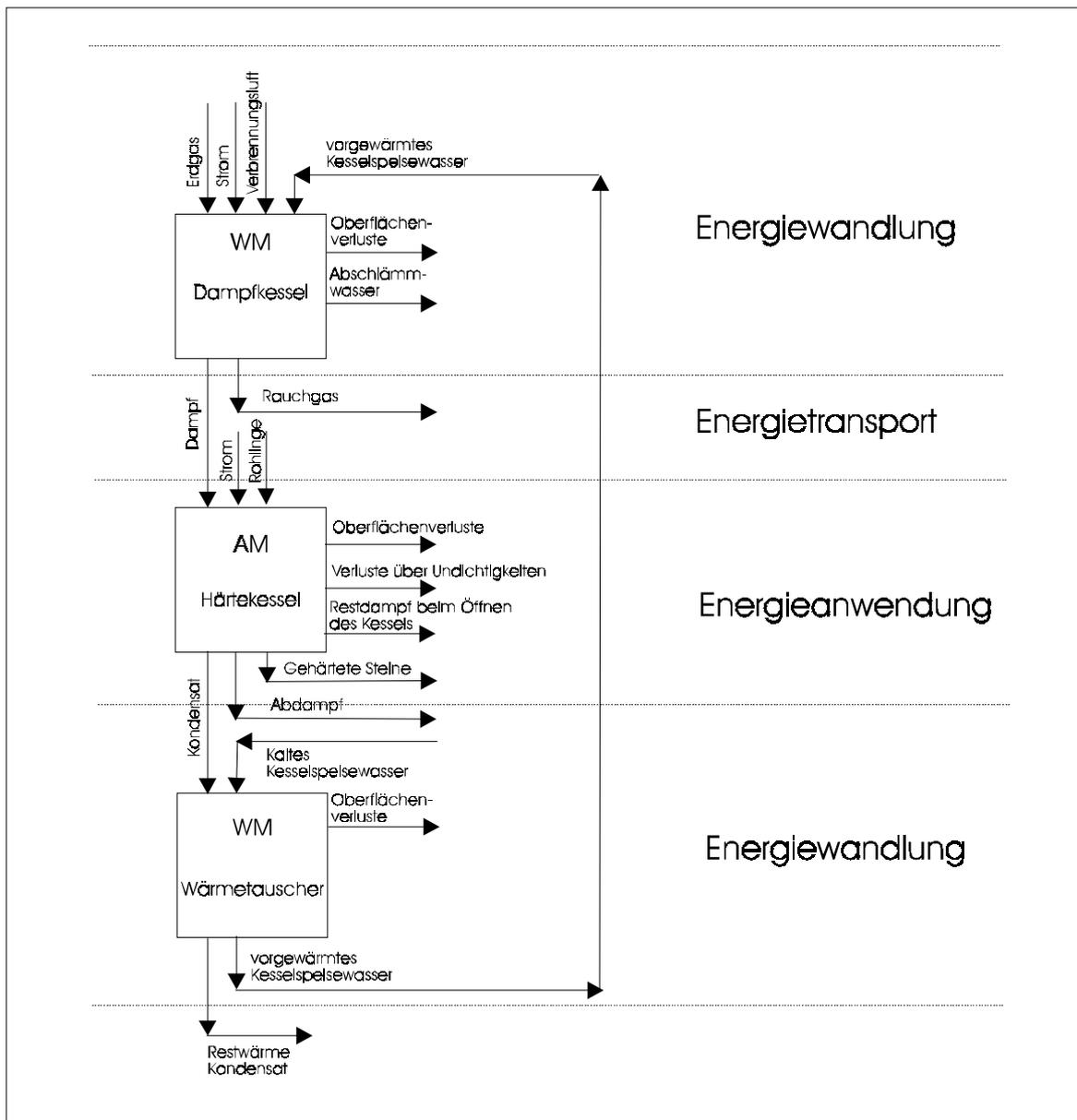


Bild 2.4-2: Vereinfachtes Modell eines Kalksandsteinwerkes mit Wärmerückgewinnung

Die Kesselspeisewasservorwärmung kann durch ein weiteres, leicht modifiziertes

Wandlermodul (Wärmeübertrager) dargestellt werden.

Der Energietransport vom Dampferzeuger zum Härtekessel wird, wegen der geringen Leitungslänge und damit geringen Relevanz, zusammen mit dem Dampferzeuger behandelt.

Zur vollständigen Beschreibung eines vereinfachten Kalksandsteinwerkes fehlt nur noch ein Modul für den Härtekessel, ein Anwendungsmodul (AW). Beim Anwendungsmodul ist die Führungsgröße nicht ein Energiebedarf, sondern ein Produktstrom.

Das Anwendungsmodul ist das Modul, welches am wenigsten standardisiert werden kann. Die Gegebenheiten in den verschiedenen Produktionsanlagen sind hierfür zu unterschiedlich.

Das hier vorgestellte Anwendungsmodul enthält die folgenden Ein- und Ausgänge:

Eingänge:

- zugeführte Energie: Dampf
- zugeführte Hilfsenergie: Strom
- zugeführtes Produkt: Kalksandsteinrohlinge

Ausgänge:

- sicher nicht nutzbare Ausgänge:
 - diffuse Oberflächenverluste
 - Verluste über Undichtigkeiten (Dichtungen der Kesselöffnung)
 - Restdampf beim Öffnen des Kessels
- theoretisch nutzbare Ausgänge:
 - Wärmeinhalt des abgeführten Produkts
 - Abdampf
 - Kondensat

Eine wichtige Information ist bei diskontinuierlichen Prozessen wie dem Härten von Kalksandsteinen der Status, in dem sich der Härtekessel (Temperatur, Druck, zeitlicher Fortschritt des Härtevorgangs) am Anfang und Ende des Intervalls befindet. Wie diese Information weitergeben bzw. gespeichert wird, ist in Kapitel 2.4.4.3 näher beschrieben.

Da der Energieeinsatz oft eine die Qualität beeinflussende Größe ist, liegen über den Energieeinsatz in den Produktionsanlagen meist umfangreichere Daten vor als über den Energieeinsatz in Nebenanlagen und in den Anlagen der Energiebereitstellung.

Im konkreten Beispiel (Härtekessel) müssen die folgenden Rechenschritte berücksichtigt werden:

1. Führungsgröße ist die Produktmenge mit den Informationen über die Behandlung der Charge (Aufheizzeit, Aufheiztemperatur, Haltedauer bei Solltemperatur bzw. Solldruck).
2. Die diffusen Oberflächenverluste werden wie beim Dampferzeuger berechnet.
3. Die elektrische Energie dient rein zur Steuerung und Regelung. Sie muss einmal ermittelt werden und kann dann als konstant angenommen werden. Die über die elektrische Energie eingebrachte Wärme wird diffus an die Umgebung abgegeben.
4. Die Aufheizleistung ist eine Funktion der vorgegebenen Temperatursteigerung, der

- Masse und spezifischen Wärmekapazität der Wägen, der zu härtenden Steine und des Kessels.
5. Die Dampf- und Kondensatmenge im Aufheizbetrieb errechnet sich mithilfe der folgenden beiden Gleichungen:
 - Die Menge an abgeführtem Kondensat ist gleich der Menge an zugeführtem Dampf, abzüglich den Kondensatmengen, die von den Steinen aufgenommen werden oder als Oberflächenfilm im Kessel verbleiben. Diese Mengen sind innerbetrieblich bekannt
 - Die im Aufheizbetrieb notwendige Dampfleistung entspricht der Summe der folgenden Leistungen: Aufheizleistung, Oberflächenverluste und mit dem Kondensat abgeführte Leistung
 6. Die Dampf- und Kondensatmenge im Haltebetrieb errechnet sich mithilfe der folgenden beiden Gleichungen:
 - Die Menge an abgeführtem Kondensat ist gleich der Menge an zugeführtem Kondensat
 - Die im Haltebetrieb notwendige Dampfleistung entspricht der Summe der folgenden Leistungen: Oberflächenverluste und mit dem Kondensat abgeführte Leistung
 7. Mit Abschluss des Härtevorganges ist das freie Volumen im Härtekessel mit Dampf gefüllt, außerdem ist das den Steinen und der Kesselwand anhaftende Kondensat im Härtekessel verblieben. Die hieraus rückgewinnbare Energie ist eine Funktion des Druckniveaus, auf dem die Energie genutzt werden soll. Das Druckniveau wird vom nächsten Modul vorgegeben. Die Energieberechnung erfolgt per Hilfsprogramm (siehe Kapitel 2.4.4).

2.4.3 Kurzdarstellung der wesentlichen Module

Die bisherigen Überlegungen aus Kapitel 2.4.2 zeigen, dass ein funktionstüchtiges Modell eines Industriebetriebes durchaus denkbar ist, zeigen aber auch, dass für die Abbildung komplexerer Abläufe noch weitere Module notwendig sind.

Die weiteren Arbeiten haben gezeigt, dass die folgenden Module für eine hinreichende Beschreibung notwendig, aber auch ausreichend sind:

- Transportmodul
- Wandlermodul
- Speichermodul
- Anwendungsmodul
- Bedarfsmodul
- Verknüpfungsmodul
- Verteilungsmodul
- Schnittstellenmodul

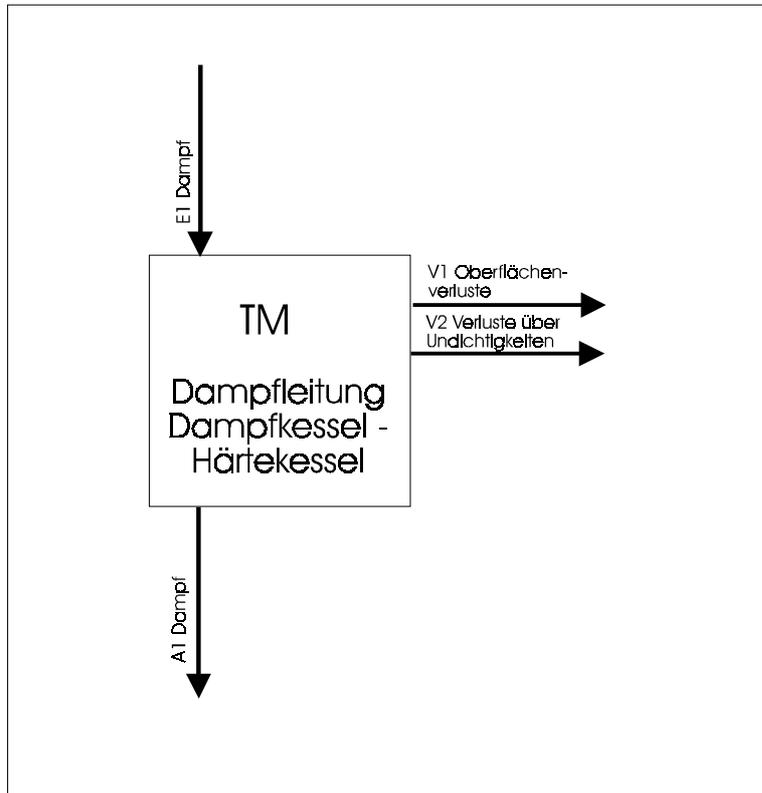
Obige Module werden im Folgenden näher erläutert.

Transportmodul

Definition:

Modul zur Darstellung von Energietransportvorgängen oder dem Transport von Energieträgern.

Darstellung eines typischen Beispiels:



Übliche Anwendungsgebiete:

Leitungen zum Transport von:

- Gas
- Öl
- Strom
- Thermoöl
- Dampf
- Heiß- und Warmwasser

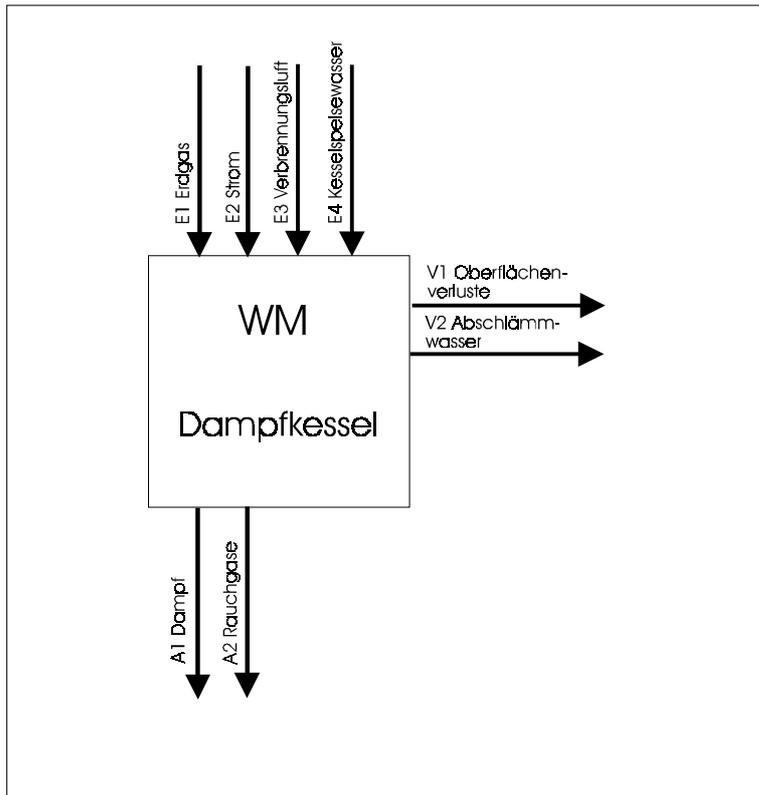
Wandlermodul

Definition:

Modul zur Darstellung von Anlagen, in denen folgende Vorgänge ablaufen:

- Energieübertragung von einem Energieträger auf einen anderen
- Änderung der energetischen Zustandsgrößen (Temperatur, Druck, Aggregatzustand) eines Energieträgers

Darstellung eines typischen Beispiels:



Übliche Anwendungsgebiete:

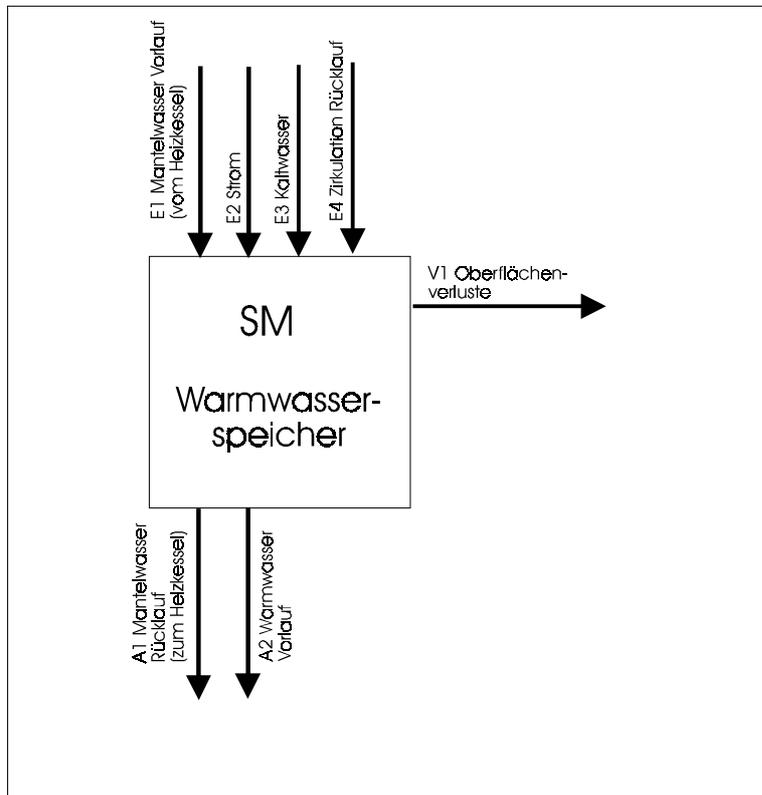
- Dampf- und Heißwassererzeuger
- Thermoölerhitzer
- Heizkessel und Warmwasserbereiter
- Kondensatoren
- Wärmeübertrager
- Verdampfer
- Dampf- und Gasturbinen
- Verbrennungsmotoren
- Generatoren, Transformatoren, Elektromotoren
- Entspannungsventile
- Verdichter

Speichermodul

Definition:

Modul zur Darstellung von Energiespeichern

Darstellung eines typischen Beispiels:



Übliche Anwendungsgebiete:

Speicher mit Aufheizeinrichtungen wie z. B.:

- Speicher für Brauchwarmwasser
- Flüssigteerspeicher (Anodenfertigung)

Speicher ohne Aufheizeinrichtungen wie z. B.:

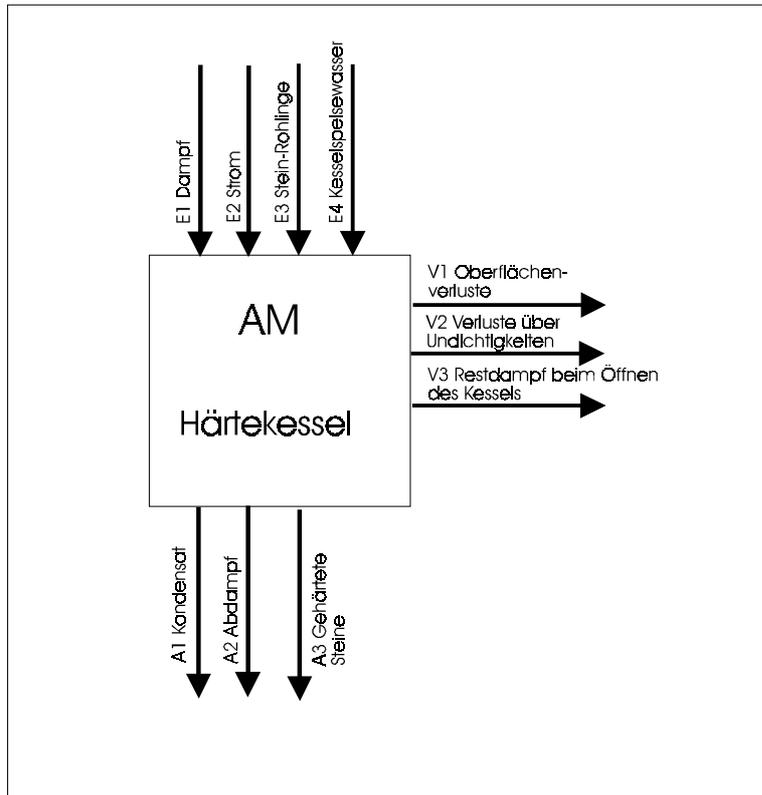
- Dampfspeicher
- Drucklose Speicher mit teilweise variablem Füllstand für Flüssigprodukte
- Druckluftspeicher

Anwendungsmodul

Definition:

Modul zur Darstellung der energetischen Vorgänge in den Produktionsanlagen des Betriebes, soweit diese nicht mit anderen Modulen dargestellt werden können.

Darstellung eines typischen Beispiels:



Übliche Anwendungsgebiete:

Produktionsanlagen jeglicher Art, wie z. B.:

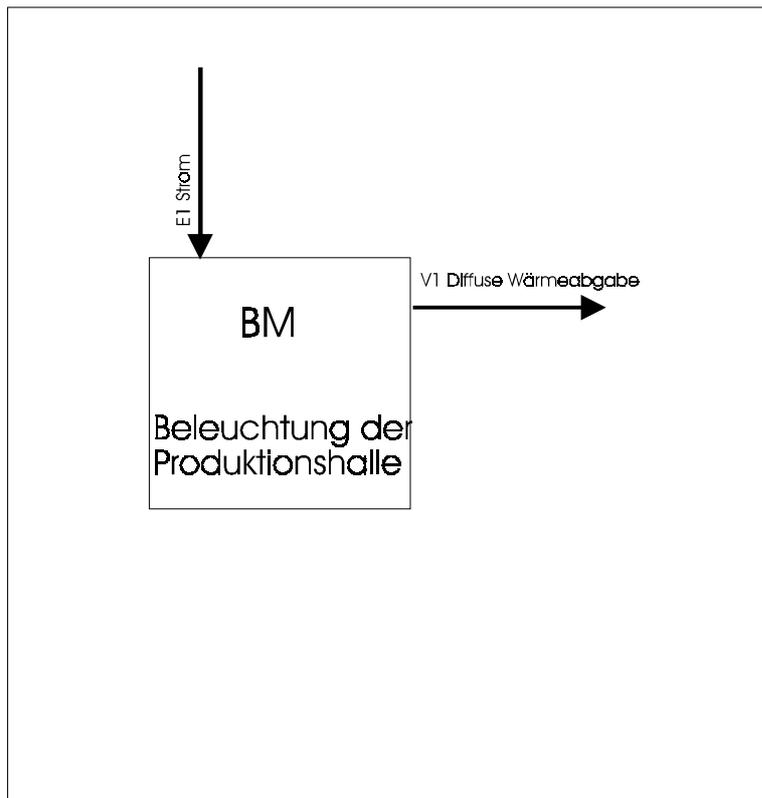
- Härtekessel
- Backöfen
- Schmelzöfen
- Pressen
- Trockner

Bedarfsmodul

Definition:

Modul zur energetischen Darstellung von Anlagen oder Betriebsteilen, die nicht analysiert und nicht modular dargestellt werden sollen, an Hand eines bekannten oder abgeschätzten Lastganges.

Darstellung eines typischen Beispiels:



Übliche Anwendungsgebiete:

Mit diesem Modul kann der Lastgang eines oder mehrerer Verbraucher in das Modulrechenprogramm eingespeist werden, ohne dass der Verbraucher modular dargestellt werden muss. Dies hat in folgenden Fällen Vorteile:

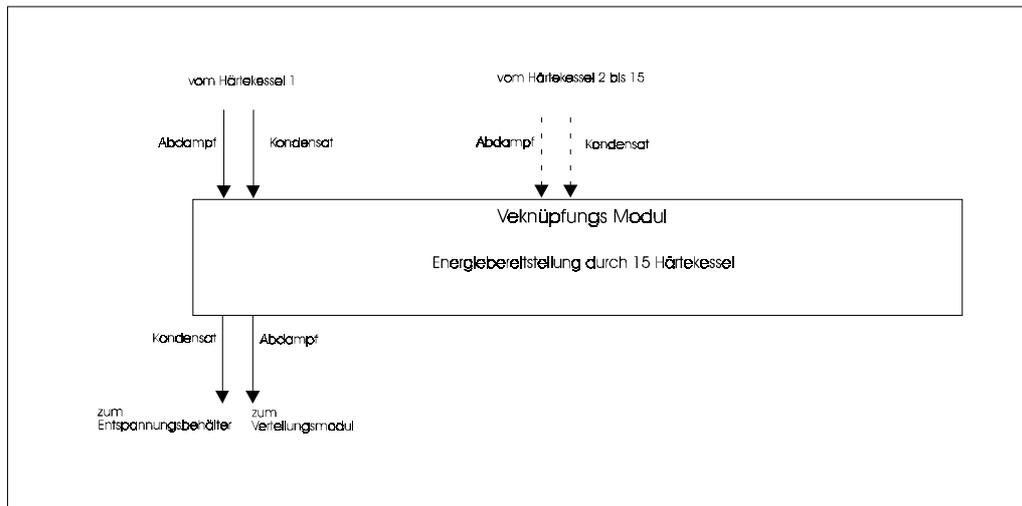
- Der mit dem Bedarfsmodul dargestellte Verbraucher soll nicht näher analysiert werden, sein Verbrauch ist aber für die Gesamtbetrachtung relevant, beispielsweise der Lastgang eines Betriebsteiles, für den kein Energiekonzept erstellt wird, der aber von der zentralen Energieversorgung des Werkes, die energetisch optimiert werden soll, mit Energie beliefert wird
- Der mit dem Bedarfsmodul dargestellte Verbraucher ist wenig komplex und hat einen einfach abzuschätzenden und nicht direkt produktionsabhängigen Lastgang, wie zum Beispiel der Lastgang der Beleuchtungsanlage des Werkes

Verknüpfungsmodul

Definition:

Das Verknüpfungsmodul fasst Energieströme aus beliebig vielen, vorgelagerten Modulen zusammen. Gleichartige Energieströme werden modulintern aufaddiert und die Energieströme an nachgeschaltete Module weitergegeben.

Darstellung eines typischen Beispiels:



Übliche Anwendungsgebiete:

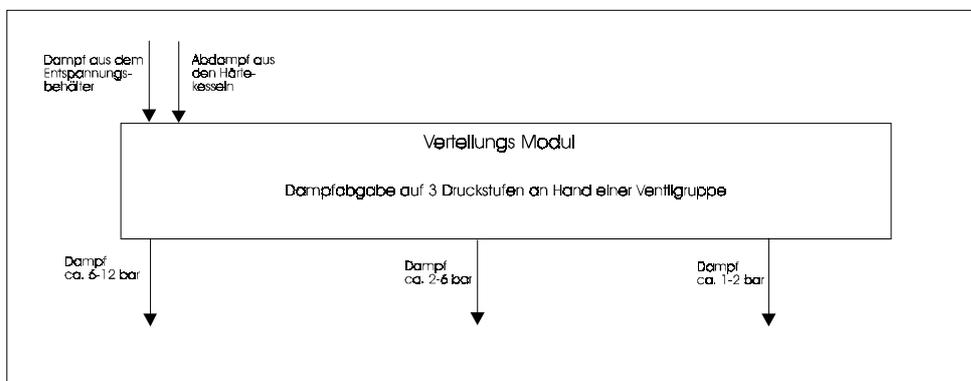
- Kondensat- oder Abdampfsammelschiene
- Sammelkanal für die Rauchgase mehrerer Brennstellen
- Energiebereitstellung durch mehrere parallel oder alternativ betriebene Anlagen

Verteilungsmodul

Definition:

Das Verteilungsmodul verteilt Energie- und Massenströme nach programmierbaren Kriterien an nachgeschaltete Module.

Darstellung eines typischen Beispiels:



Übliche Anwendungsgebiete:

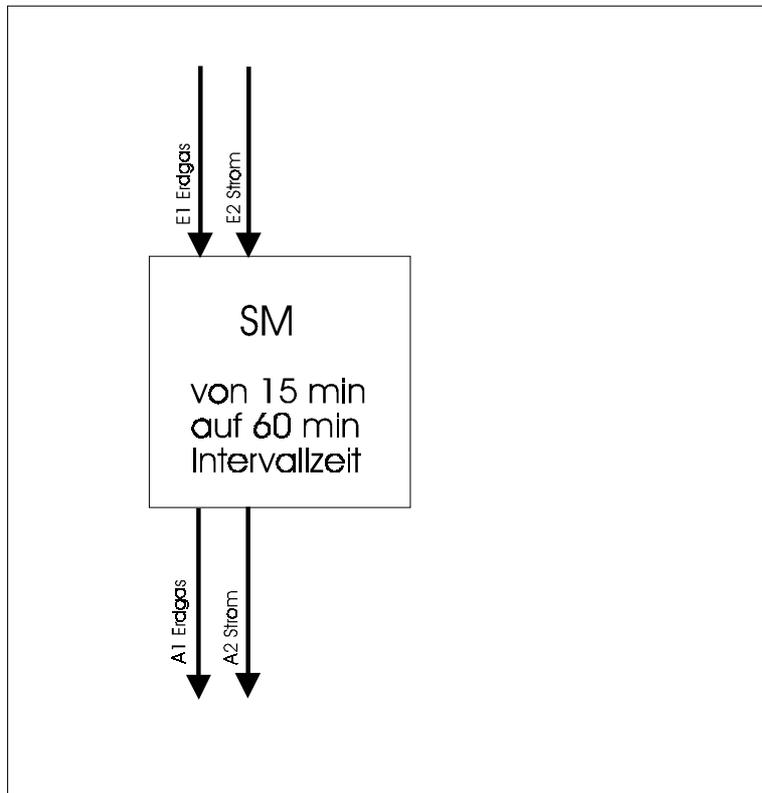
Verteilung von Energieströmen mit stark schwankendem Druck- oder Temperaturverlauf auf mehrere Teilströme mit verschiedenen Druck- oder Temperaturstufen.

Schnittstellenmodul

Definition:

Modul zur Kopplung von Vorgängen mit unterschiedlichen Intervallzeiten.

Darstellung eines typischen Beispiels:



Übliche Anwendungsgebiete:

Betrachtung von einzelnen, schnell ablaufenden Vorgängen in Betrieben, deren sonstige Abläufe mit normalen Intervallzeiten bearbeitet werden können. Beim in Kapitel 4.1 näher beschriebenen Kalksandsteinwerk genügt als Intervallzeit eine Stunde; nur die Härtekessel können mit einer Intervallzeit von 5 Minuten besser dargestellt werden.

2.4.4 Modulrechenprogramm

Aus den vorangegangenen Kapiteln ist nur die Funktionsweise einzelner Module bekannt. Um mithilfe mehrerer Module einen Betrieb abbilden zu können und um mit einem mehrmaligen Einsatz derselben Module eine zeitliche Abfolge beschreiben zu können, muss ein Programm, das Modulrechenprogramm, geschaffen werden, welches die folgenden Aufgaben übernehmen bzw. die Umsetzung folgender Aufgaben unterstützen kann:

- **Abbildung der Struktur des untersuchten Betriebes** (Näheres siehe Kapitel 2.4.4.1):
 - Erstellen des Modulschaltbildes
 - Abfragen und Speichern der Parameter der Module und der physikalischen Werte der beteiligten Stoffströme
 - Hilfestellung bei der Programmierung der Module
 - Erstellen der Verknüpfungen zwischen den verschiedenen Modulen
 - Bearbeitung komplexer Strukturen in mehreren Schritten
- **Festlegung der zeitlichen Rahmendaten** (Näheres siehe Kapitel 2.4.4.2):
 - Abfrage von Intervallzeit und Betrachtungszeitraum
 - Alle Einzelmodule auf die vorgegebene Intervallzeit setzen
- **Ablaufsteuerung des Rechenvorganges** (Näheres siehe Kapitel 2.4.4.3):
 - Versorgung der Anwendungsmodule mit den Startdaten
 - Datentransfer von Modul zu Modul
 - Speicherung von Zwischenergebnissen
 - Festlegung der Reihenfolge, mit der die verschiedenen Module durchlaufen werden
 - Nach dem Durchlauf von Intervall n Start von Intervall n+1
 - Ausweisen des Ergebnisses
- **Datenmanagement** (Näheres siehe Kapitel 2.4.4.4):
 - Eingabe und Einlesen vorhandener Daten und Informationen
 - Generierung nicht vorhandener Daten
 - Vergleich vorhandener Daten mit Ergebnissen aus Berechnungen des Modulrechenprogramms
- **Unterstützung bei der Energiebedarfsoptimierung** (Näheres siehe Kapitel 2.4.4.5):
 - Erstellen von Checklisten zum rationeller Energieeinsatz
 - Optimierungsrechnung an Hand schrittweiser Veränderung von Parametern
 - Schnelle Abschätzung neuer Ideen auf ihre energetischen und wirtschaftlichen Auswirkungen
- **Erstellen von Grafiken** (Näheres siehe Kapitel 2.4.4.6)

2.4.4.1 Abbildung der Struktur des untersuchten Betriebes

In einem ersten Schritt muss der Nutzer die Struktur des untersuchten Betriebes modular darstellen, mit maximaler Unterstützung durch das Programm:

- Auswahl und Aufruf aller gängigen oder bereits selbst programmierten Module aus einer Moduldatei
- wenn notwendig, Unterstützung bei der Anpassung einzelner Module an die Gegebenheiten des Betriebes, z. B. in einem Änderungsmodus, der die wichtigsten Formeln und Hilfsprogramme anbietet
- Unterstützung bei der Eingabe von Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Ein- und Ausgangsgrößen der Module, durch automatische Berechnung dieser Zusammenhänge bei Eingabe der entsprechenden Datenreihen (z. B. bei einem Dampfkessel Berechnung der Abhängigkeit der Rauchgastemperatur von der Kessellast aus mehreren Wertepaaren)
- Abfragen und Speichern der Parameter der einzelnen Module und der beteiligten Stoffströme durch das Programm
- einfache Verknüpfung der Module durch Mausclick am Ausgang und Eingang der jeweiligen Module

Um einen ersten grafischen Eindruck eines Modulschaltbildes zu vermitteln, sei auf Bild 4.1-2 (Seite 66) verwiesen.

Bei der Abbildung der Struktur eines Betriebes müssen der oder die Bilanzkreise eindeutig definiert werden. Der Bilanzkreis umfasst die Festlegung aller für die weitere Betrachtung relevanten Bezugspunkte:

Bezugspunkt	Beispiele für eine Festlegung
Räumliche Abgrenzung	Einzelne Anlage Werkszaun
Temperatur	15 °C als angenäherte mittlere Außentemperatur Testreferenzjahr für Betrachtungen mit hoher Relevanz der exakten Außentemperatur
Druck	1013 mbar Tatsächlicher Luftdruck, abhängig von der Lage des Betriebes über Normalnull
Feuchte	Feuchte der Umgebungsluft im Jahresmittel
Bewegungsenergie	Alle Systeme im Ruhezustand

Auf die Verhältnisse in Industriebetrieben übertragen, wird als größter Bilanzkreis üblicherweise der Werkszaun verwendet und als restliche Bezugsgrößen die mittleren Zustände der Umgebung. Als Bilanzzeitraum wird meist ein Jahr gewählt.

Bei komplexen Vorgängen muss das Programm eine Bilanzkreisschachtelung unterstützen. Die zu untersuchende komplexe Einheit wird in verschiedene Bilanzkreise aufgeteilt. Jeder dieser Bilanzkreise kann dann separat bearbeitet werden.

2.4.4.2 Intervallzeit und Betrachtungszeitraum

Alle bisherigen Überlegungen galten für die Betrachtung eines Zeitraums mit stationären Ein- und Ausgangsgrößen. Dieser Zeitraum wird im Folgenden als Intervall bezeichnet. Durch eine Abfolge mehrerer Intervalle können Vorgänge mit sich ändernden Ein- und Ausgangsgrößen angenähert werden. Je kürzer die Intervallzeit, desto geringer wird der sich aus dieser Annäherung ergebende Fehler.

Die gesamte zu betrachtende Zeitspanne wird als Betrachtungszeitraum bezeichnet. Im Hinblick auf ein Jahr Betrachtungszeitraum und 1 Stunde Intervallzeit wurde für das Modulrechenprogramm eine Unterteilung des Betrachtungszeitraumes in 8760 Intervalle vorgenommen. Die Intervallzeit wählt der Nutzer des Modulrechenprogramms entsprechend der geforderten Genauigkeit zwischen einer Sekunde und einer beliebig langen Zeitspanne.

2.4.4.3 Ablaufsteuerung des Rechenganges

Vor dem Start der Berechnung müssen die folgenden Schritte durchlaufen werden:

- Erstellung des Modulschaltbildes
- Festlegung von Intervallzeit und Betrachtungszeitraum
- Programmierung der Module, Eingabe aller Parameter

Die Berechnungen basieren auf der in jedem Industriebetrieb zentralen Größe, der Produktion. Für jedes Anwendungsmodul muss in jedem Intervall feststehen, welches Produkt oder auch Vorprodukt in welchen Mengen produziert wird. Festgehalten werden die gesamte Produktion und ihre Aufteilung auf die verschiedenen Module und einzelnen Intervalle in der Produktionsdatei.

Die Forderung nach einer sehr detaillierten Produktionsdatei erscheint aufwändig. Dies kann jedoch aus folgenden Gründen als unkritisch gesehen werden:

- Diese Daten müssen in einem Betrieb, zumindest weitgehend, vorliegen, da sie im Rahmen der Personal- und Produktionsplanung und der Kostenabrechnung dringend erforderlich sind
- Die Datenmenge ist weit geringer als oft vermutet, da sich viele Abläufe häufig wiederholen. Beispielsweise untersuchte eine untersuchte Bäckerei nur nach 8 verschiedenen Produktionstagen

Zudem unterstützt das zur Erstellung der Produktionsdatei vorgesehene Hilfsprogramm die Eingabe von Daten, die nicht im geforderten Datenformat vorliegen (mündliche Informationen, Daten mit abweichender zeitlicher Gliederung, Daten mit problematischer Zuordnung zu einzelnen Anwendungsmodulen), entsprechend Kapitel 2.4.4.4.

Für das Anwendungsprogramm liegen nach der Erstellung der Produktions- und der Bedarfsdatei alle notwendigen Daten für den Start des Rechenganges vor. Dieser läuft wie folgt ab:

Zuerst wird ein Datenblatt angelegt, in dem intervallweise die berechneten Daten zu allen Energie- und Massenströmen für alle Module abgelegt werden. Die Informationen

über die Anzahl der Module und der einzelnen Energie- und Massenströme sind aus dem Modulschaltbild problemlos ermittelbar.

Das Programm beginnt mit dem Intervall 0001.

Der Start der Berechnung erfolgt bei einem beliebigen Anwendungsmodul. Gelangt das Programm zu einem Modul, bei dem zur Berechnung der fehlenden Größen eine Eingangsgröße fehlt, rechnet das Programm an anderer Stelle weiter, bis die Berechnung der fehlenden Größen abgeschlossen ist.

Bei der Berechnung kann das Programm auf Module stoßen, die den benötigten Energie- oder Massenstrom zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht liefern können (wie z. B. Dampf aus einem nicht auf Betriebstemperatur befindlichen Dampfkessel), also Module von Anlagen, die bereits früher gestartet werden müssten, um mit Beginn des Intervalls n lieferbereit zu sein. Das Modulrechenprogramm startet das betreffende Modul und alle mit ihm gekoppelten Module zum Zeitpunkt $n-1$ und prüft, ob dann zum Zeitpunkt n Betriebsbereitschaft vorliegt.

Wenn dieses Kriterium erfüllt ist, werden die Daten der betroffenen Module, Energie- und Massenströme für den Zeitpunkt $n-1$ mit den neuen Daten überschrieben.

Liegt keine Betriebsbereitschaft vor, reduziert das Programm den Startzeitpunkt so lange um ein Intervall ($n-2$, $n-3$ usw.), bis es zum Zeitpunkt n Betriebsbereitschaft verzeichnen kann.

Als Ergebnis weist das Programm den nach den verschiedenen Energieträgern aufgeschlüsselten Energieverbrauch für den betrachteten Betrieb oder die betrachtete Anlage als Mittelwerte über die Intervallzeit für den gesamten Betrachtungszeitraum aus.

Zusätzliche Details:

- Komplexere Rechenschritte werden aus dem einzelnen Modul ausgelagert und durch meist bereits existierende Hilfsprogramme abgearbeitet
- Die diffusen Oberflächenverluste hängen unter Anderem von der Umgebungstemperatur und damit vom Aufstellungsort ab. Im Datensatz des einzelnen Moduls ist der Aufstellungsort (z. B. Außenanlage, Halle 1 usw.) gespeichert. Für jeden dieser Aufstellungsorte kann der Jahresgang der Temperatur eingegeben oder ein bereits gespeicherter Jahresgang aufgerufen werden
- Wird die Maximalleistung einzelner Module überschritten, wird mit der überhöhten Leistung weitergerechnet, zusätzlich jedoch diese Überschreitung als Fehlermeldung an den Bearbeiter weitergegeben
- Bilden zwei oder mehrere Module eine „Berechnungsschleife“, muss das Programm die Rechenvorschriften aller betroffener Module zusammenfassen und das daraus folgende Gleichungssystem mit zusätzlichen Unbekannten, aber auch zusätzliche Gleichungen lösen. Beispiel: Die Verbrennungsluft eines Dampferzeugers (Modul 1) wird mithilfe der Rauchgase des Dampferzeugers in einem Wärmeübertrager (Modul 2) vorgewärmt. Zur Berechnung der Verbrennungslufttemperatur benötigt man die Rauchgasmenge (wird in Modul 1 berechnet). Zur Berechnung der Rauchgasmenge ist wiederum die Verbrennungstemperatur notwendig (wird in Modul 2 berechnet)

- Im Rahmen der Berechnungen innerhalb eines Moduls müssen alle relevanten physikalischen Zustandsgrößen, wie z. B. die Kesseltemperatur oder das Druckniveau des Härtekessels, am Ende des Intervalls abgespeichert werden. Dies sind die Eingangsgrößen für die Berechnungen bei der Bearbeitung des nächsten Intervalls

2.4.4.4 Dateneingabe und Datenvergleich

Das Modulrechenprogramm und diverse Hilfsprogramme benötigen Daten unterschiedlichster Form:

Einzelwerte:

- Die Parameter der Module. Diese werden normalerweise bereits beim Aufruf der einzelnen Module eingegeben oder von der Vorlage übernommen, können aber auch später noch eingegeben oder geändert werden

Lastgänge:

- Die Produktionsdaten der Jahresproduktionsdatei
- Die Verbrauchsdaten der Bedarfsdatei
- Die Temperaturverlaufsdatei der Aufstellungsorte
- Die Energieverbrauchswerte für das Hilfsprogramm Datenvergleich (Erklärung Hilfsprogramm Datenvergleich, siehe unten)
- Die Datensätze für alle zu betrachtenden Abwärmequellen und –senken, wenn das Quellen-Senken-Verknüpfungsprogramm separat vom Modulrechenprogramm genutzt wird

Die Lastgänge oder Teile davon können als ASCII-File eingelesen werden. Dies ermöglicht die Übernahme der Daten aus praktisch allen mikroprozessorgesteuerten Messgeräten und aus allen handelsüblichen Programmpaketen zum Registrieren und Verarbeiten von Energiedaten.

In der betrieblichen Praxis werden nur selten komplette Lastgänge vorliegen. Dem Benutzer muss daher die Möglichkeit gegeben werden, alle über den Betriebsablauf verfügbaren Daten zu nutzen. Daher wurde die Dateneingabe wie folgt konzipiert /9/:

Die Daten eines Tages werden als eine Einheit mit eigenem, vom Benutzer gewählten Namen gespeichert. Aus solchen Tagesdaten-Einheiten können Wochendaten-Einheiten zusammengestellt werden. Bei einem Betrachtungszeitraum von einem Jahr besteht der gesamte Datensatz aus einer Abfolge von 53 Wochendaten-Einheiten, welchen jeweils sieben Tagesdaten-Einheiten zugeordnet sind. Dies hat den Vorteil, dass Tage oder Wochen, die den gleichen oder sehr ähnlichen Lastgang aufweisen wie andere Tage oder Wochen, nicht neu eingegeben oder eingelesen werden müssen. Tages- und Wochendaten-Einheiten können auch editiert und mit den geänderten Werten als neue Einheit abgespeichert werden. Bild 2.4-3 zeigt beispielhaft, wie die übergeordneten Einheiten auf untergeordnete Einheiten zugreifen.

Alle Tage und Wochen lassen sich mit Korrekturfaktoren versehen. Der Nutzer kann sich

jederzeit die Jahresenergiemenge des Datensatzes berechnen lassen und mit bekannten Jahresenergiemenge aus der betrieblichen Energiedatenerfassung vergleichen. Durch die Eingabe von Korrekturfaktoren für bestimmte Tages- oder Wochendaten-Einheiten können beide Energiemengen gut in Übereinstimmung gebracht und der eingegebene Lastgang an saisonale Schwankungen angepasst werden.

Dem Bearbeiter wird so die Möglichkeit gegeben, alle vorliegenden Informationen (Messperioden, einzelne Werte, Jahresverbräuche, wöchentliche oder monatliche Zählerablesungen, allgemeine betriebstechnische Infos wie Betriebsferien und Zeiten reduzierter Produktion) sinnvoll in einen Datensatz zu integrieren. Dieser Datensatz stellt dann nur eine Näherung an den wirklichen Lastgang dar, jedoch die bestmögliche Näherung ohne zusätzliche Messungen.

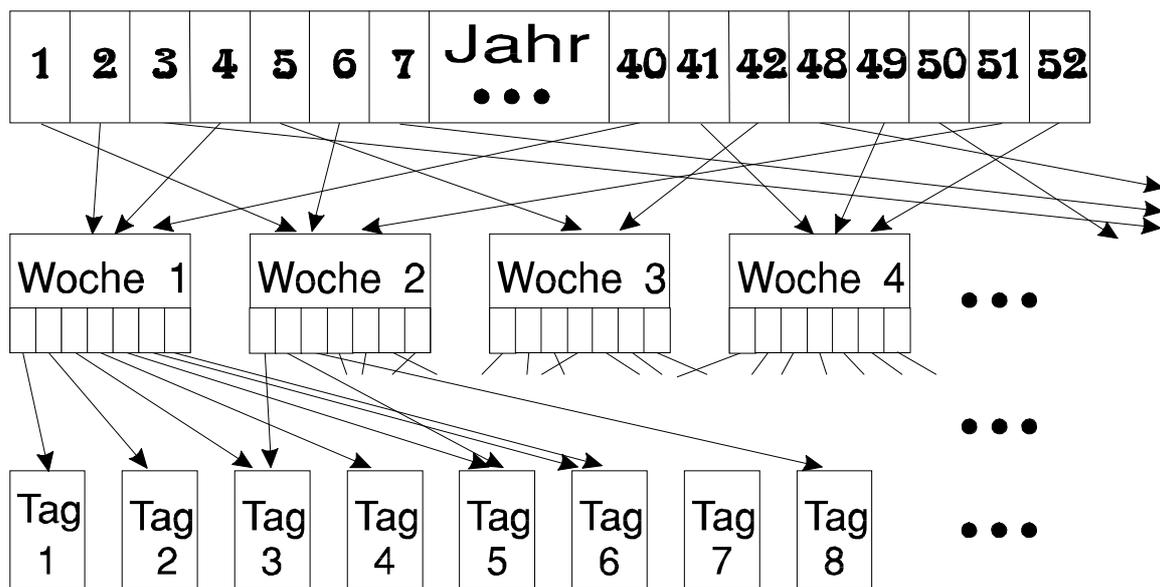


Bild 2.4-3: Zugriff übergeordneter Einheiten auf untergeordnete Einheiten bei der Dateneingabe /9/

Hilfsprogramm Datenvergleich

Nachdem die Struktur des Betriebes modular dargestellt, die Module programmiert und die Daten eingegeben sind, wird in einem nächsten Schritt die Qualität der bisherigen Arbeit geprüft. In das Modulrechenprogramm werden die Produktionsdaten für einen vergangenen Zeitraum eingegeben und daraus der Energieverbrauch für den Zeitraum berechnet. Die verfügbaren Daten über den tatsächlichen Energieverbrauch im selben Zeitraum werden in das Kontrollprogramm eingegeben. Dieses akzeptiert die Energieverbrauchsdaten auch mit unterschiedlichen Intervallzeiten und kürzeren Betrachtungszeiträumen. Das Kontrollprogramm vergleicht die berechneten Werte mit den eingegebenen, berechnet die Abweichungen und weist auf besonders kritische Einzelwerte hin. An Hand der Abweichungen kann auf mögliche Fehler geschlossen werden. Führen auch ein Nachbessern und eine kritische Untersuchung der Qualität der innerbetrieblichen Energiedatenerfassung zu keinem besseren Ergebnis, muss die Datenbasis durch weitere Messungen oder Untersuchungen erweitert werden.

2.4.4.5 Unterstützung bei der Energiebedarfsoptimierung

Das bisher vorgestellte Programm kann natürlich nicht selbstständig Vorschläge zur Energieverbrauchsoptimierung entwickeln. Es unterstützt jedoch bei der Suche und Bewertung von Möglichkeiten eines rationelleren Energieeinsatzes durch folgende Angebote:

- Eine Checkliste mit allen ungenutzten Energieströmen (alle direkten Verlustausgänge mit der Bezeichnung V und alle nicht genutzten sonstigen Ausgänge mit der Bezeichnung A). Der Verlust über den gesamten Betrachtungszeitraum wird mit ausgewiesen; damit ist die Relevanz des Verlustpostens schnell ersichtlich
- Eine Checkliste mit dem Exergieverlust jedes Moduls über den gesamten Betrachtungszeitraum. Module mit hohem Exergieverlust können dann überprüft werden, ob sie nicht an anderer Stelle günstiger in den Wärmestrom eingebunden werden können oder ob eine Absenkung der Temperatur der Eingangsströme machbar und sinnvoll ist
- Das in Kapitel 2.5 dargestellte Quellen-Senken-Verknüpfungsprogramm, bei dem automatisch geprüft wird, ob von den ungenutzten, aber gefassten Abwärmequellen Energie wirtschaftlich und energetisch sinnvoll auf die vorhandenen potenziellen Wärmesenken übertragen werden kann
- Die Möglichkeit, bei der Betrachtung einzelner Ideen eines rationelleren Energieeinsatzes die damit verbundenen Änderungen (Laufzeiten, Temperaturen usw.) in das Modell einzugeben. Damit liegen nach kurzer Rechenzeit die Auswirkungen dieser Maßnahme auf den Betrieb über den gesamten Betrachtungszeitraum vor, inklusive einer verlässlichen Aussage über die mit der Maßnahme verbundene Energieverbrauchsreduzierung
- Das Modulrechenprogramm kann beliebige Parameter von Modulen oder Energie- oder Massenströmen, in vorher festgelegten Bereichen, schrittweise verändern und die Abhängigkeit des Ergebnisses von diesen Veränderungen dokumentieren bzw. das Optimum ausweisen. Hierdurch können einzelne Anlagen oder Fertigungsabläufe durch Variation verschiedener Größen energetisch optimiert werden

2.4.4.6 Grafische Darstellungen

Nach Abschluss des Rechenvorganges für den gesamten Betrachtungszeitraum liegt für jeden Energiestrom und für jeden Schritt seiner Nutzung der komplette Datensatz der relevanten Größen vor. Abgesehen vom Aufwand, dies zu programmieren, ist es problemlos möglich, die Daten grafisch aufzubereiten. Folgendes ist machbar:

- Jahresdauerlinien
- Jahresverläufe
- spezifische Energieverbräuche, abhängig von der Produktion
- Energieflussbilder

Alle grafischen Auswertungen sind sowohl für den gesamten Betrachtungszeitraum wie auch für kürzere Zeiträume oder - soweit sinnvoll - für bestimmte Zeitpunkte (z. B. Höchstlast) möglich und müssen sich nicht auf die gesamte betrachtete Anlage beziehen.

2.5 Quellen-Senken-Verknüpfungsprogramm

2.5.1 Grundgedanke

Wenn die Möglichkeiten der Energieverbrauchsoptimierung innerhalb eines Prozesses ausgeschöpft sind, verbleiben in der Regel Abwärmeströme auf einem für andere Prozesse zumindest theoretisch nutzbaren Temperaturniveau. Im Rahmen einer Gesamtoptimierung energetischer Prozesse muss die energetische Verknüpfung dieser Abwärmeströme mit potenziellen Wärmesenken, u. U. unter Zuhilfenahme von Wärmespeichern, geprüft werden.

Das Ergebnis einer Verknüpfung von Wärmesenken und Wärmequellen muss der Prämisse „energetisch optimal, soweit wirtschaftlich machbar“ genügen. Das heißt, die energetische Optimierung des Gesamtsystems, normalerweise eines Industriebetriebes, hat sich an den durch den Betreiber des Systems vorgegebenen wirtschaftlichen Grenzen zu orientieren. Die Forderung nach einer „energetischen Optimierung unter vorgegebenen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen“ eines Gesamtsystems, nicht der eines einzelnen Wärmeübertragers, führt bei größeren Systemen schnell zu praktischen Problemen. Dies wird auch an anderer Stelle aufgezeigt /10/.

Erst nach der Optimierung des Gesamtsystems ist es sinnvoll, den einzelnen Wärmeübertrager im Detail auszuwählen und auszulegen. Ergeben sich hierbei wesentliche Abweichungen von den sich aus der Optimierung ergebenden Vorgaben, kann eine nochmalige Optimierung notwendig sein.

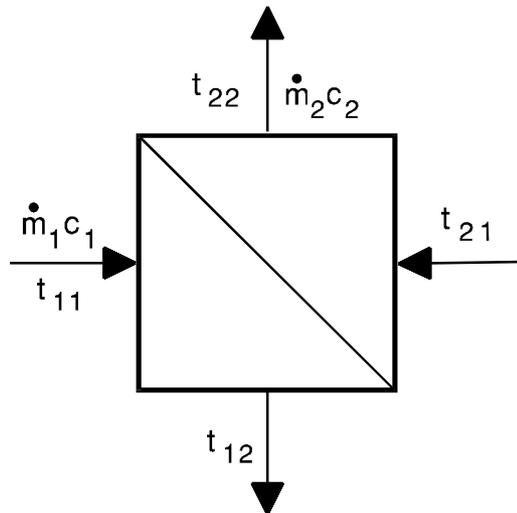
Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Programm entwickelt, welches die „energetische Optimierung unter vorgegebenen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen“ komplexer Systeme unterstützt und damit wesentlich beschleunigt.

2.5.2 Verwendete Gleichungen für die Wärmeübertragung durch Wärmeübertrager

Die folgenden Ausführungen und Bilder sind im Wesentlichen aus /9/ entnommen.

2.5.2.1 Elementare Wärmeübertragergleichungen

Für Gegenstrom-Wärmeübertrager wird die Bezeichnung der Ein- und Ausgangsgrößen entsprechend Bild 2.5-1 verwendet:



mit

$\dot{m}_1 c_1$	Wärmekapazitätsstrom Quelle
$\dot{m}_2 c_2$	Wärmekapazitätsstrom Senke
t_{11}	Eintrittstemperatur des Quellenmediums
t_{12}	Austrittstemperatur des Quellenmediums
t_{21}	Eintrittstemperatur des Senkenmediums
t_{22}	Austrittstemperatur des Senkenmediums

Bild 2.5-1: Gegenstrom-Wärmeübertrager: Bezeichnung der Ein- und Ausgangsgrößen

Für den stationären Zustand errechnet sich die durch einen Wärmeübertrager übertragbare Leistung wie folgt:

$$\dot{Q} = kA \Delta t_m \quad (1)$$

mit

\dot{Q}	Übertragbare Leistung	[W]
k	Wärmedurchgangskoeffizient	[W/m ² K]
A	Fläche des Wärmeübertragers	[m ²]
Δt_m	Mittlere Temperaturdifferenz (siehe Gl. 10)	[K]

Der Wärmedurchgangskoeffizient k ist abhängig von Bauart, Material und Betriebsweise des Tauschers. Er wird räumlich konstant über die gesamte Übertragerfläche angenommen. Die Fläche des Wärmeübertragers A entspricht nur der am Wärmetausch beteiligten Fläche des Wärmeübertragers. Bei gekrümmten Wänden zwischen den Medien wird im Rahmen dieser Arbeit mit der mittleren Fläche und nicht mit der jeweiligen Außen- oder Innenfläche gerechnet.

Die übertragene Leistung lässt sich auch aus den Parametern der Stoffströme berechnen:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_1 &= \dot{m}_1 c_1 (t_{11} - t_{12}) \\ \dot{Q}_2 &= \dot{m}_2 c_2 (t_{22} - t_{21}) \end{aligned} \quad (2)$$

mit

\dot{Q}_1	Abgegebene Leistung der Quelle	[W]
\dot{Q}_2	Aufgenommene Leistung der Senke	[W]

Geht man von einem verlustlosen Wärmeübertrager aus, gilt:

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 \quad (3)$$

Diese Vereinfachung ist zulässig, wenn Wärmeübertrager mit gut wärmegeprägten Umgrenzungsflächen eingesetzt werden. Die Oberflächenverluste gut wärmegeprägter Wärmeübertrager sind vernachlässigbar gering und dürfen nicht mit Verlusten verwechselt werden, die daraus resultieren, dass nicht die gesamte durch die Quelle bereitgestellte Energie auf das Medium der Senke übertragen werden konnte.

Die Berechnung von Wärmeübertragern stützt sich unabhängig von der Strömungsführung auf sechs dimensionslose Kennzahlen (siehe auch /11/):

1. Dimensionslose Temperaturänderung des Quellenmediums

$$\Phi_1 = \frac{t_{11} - t_{12}}{t_{11} - t_{21}} \quad 0 \leq \Phi_1 \leq 1 \quad (4)$$

2. Dimensionslose Temperaturänderung des Senkenmediums

$$\Phi_2 = \frac{t_{22} - t_{21}}{t_{11} - t_{21}} \quad 0 \leq \Phi_2 \leq 1 \quad (5)$$

3. Dimensionslose mittlere Temperaturdifferenz

$$\Theta = \frac{\Delta t_m}{t_{11} - t_{21}} \quad (6)$$

Bei $\Theta > 0$ ist der Prozess mit endlichem Produkt aus Wärmeübertragerfläche und Wärmeübergangszahl möglich

Bei $\Theta = 0$ ist der Prozess nur mit unendlichem Produkt aus Wärmeübertragerfläche und Wärmeübergangszahl möglich

Bei $\Theta < 0$ ist der Prozess nicht möglich

4. Anzahl der Übertragungseinheiten (Number of Transition Units) des Quellenmediums

$$\Psi_1 = \frac{\Phi_1}{\Theta} = \frac{t_{11} - t_{12}}{\Delta t_m} \quad 0 \leq \Psi_1 \leq 1 \quad (7)$$

5. Anzahl der Übertragungseinheiten (Number of Transition Units) des Senkenmediums

$$\Psi_2 = \frac{\Phi_2}{\Theta} = \frac{t_{22} - t_{21}}{\Delta t_m} \quad 0 \leq \Psi_2 \leq 1 \quad (8)$$

6. Verhältnis der Wärmekapazitätsströme

$$\frac{m_1 c_1}{m_2 c_2} = \frac{\Psi_1}{\Psi_2} = \frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{t_{22} - t_{21}}{t_{11} - t_{12}} \quad (9)$$

Die Abhängigkeit der sechs Kenngrößen voneinander wird durch die Art der Strömungsführung bestimmt. Bis auf reine Gleich- und Gegenstromführung sind diese Zusammen-

hänge sehr komplex und meist nur iterativ lösbar. Üblicherweise werden aus vorhandenen Daten zwei der sechs Kennzahlen errechnet und die restlichen aus Diagrammen ermittelt (in /11/ sind Diagramme für 31 Strömungsführungen aufgezeigt).

Da die Optimierung des Gesamtsystems als Vorstufe zur detaillierten Auslegung des einzelnen Wärmeübertragers zu betrachten ist, wird von der im Allgemeinen energetisch und in weiten Bereichen auch wirtschaftlich günstigsten Strömungsführung ausgegangen, der reinen Gegenstromführung in rekuperativen Wärmeübertragern. Dies bedeutet jedoch nicht, dass im Einzelfall nicht eine andere Strömungsführung oder ein regenerativer Wärmeübertrager günstiger sein könnte. Dies zeigt dann die detaillierte Beschäftigung mit dem einzelnen Wärmeübertrager und im Bedarfsfall die Nachoptimierung.

Um das weitere Vorgehen bei der Berechnung festlegen zu können, muss erst bestimmt werden, welche Variablen im Allgemeinen bekannt und unbekannt sind.

Bekannt sein müssen:

- der zur Verfügung stehende Massenkapazitätsstrom der Wärmequelle m_1c_1
- die Eintrittstemperatur des Quellenmediums t_{11}
- der zur Aufheizung zur Verfügung stehende Massenkapazitätsstrom der Wärmesenke m_2c_2
- die maximal zulässige bzw. gewünschte Austrittstemperatur des Senkenmediums t_{22}
- die Rücklauftemperatur des Senkenmediums t_{12} und damit seine Eintrittstemperatur in den Wärmeübertrager

Alle oben als bekannt geforderten Größen sind im Rahmen einer Betriebsuntersuchung ermittelbar und Grundlage jeglicher sinnvoller energetischer Betrachtung. Mit der Angabe der Werte wird noch keine Aussage getroffen, ob die angegebenen Mengen oder Größen voll genutzt oder erreicht werden können.

Unbekannt dürfen sein:

- die Austrittstemperatur des Quellenmediums t_{12} (die Berücksichtigung von Mindesttemperaturen muss jedoch möglich sein)
- der tatsächlich genutzte Massenkapazitätsstrom der Wärmequelle $m_1'c_1$ (zur Verfügung stehender Massenkapazitätsstrom, abzüglich des Massenstroms, der mangels Bedarf am Wärmeübertrager mittels Bypass vorbeigeleitet wird)
- die Austrittstemperatur des Senkenmediums t_{22}
- die Fläche des Wärmeübertragers A
- die mittlere Temperaturdifferenz Δt_m

Diese Werte folgen aus der Optimierung.

Je nach räumlicher Lage von Quelle und Senke, der Art der Medien und Sicherheitsaspekten, kann es empfehlenswert sein, Quelle und Senke mit einem Wärmeübertrager oder mit einem Doppelwärmeübertrager mit Zwischenkreislauf zu koppeln. Im Folgenden wird auf die Berechnung des wirtschaftlichen Optimums bei Einsatz eines Wärmeübertragers eingegangen. Das Quellen-Senken-Verknüpfungsprogramm bietet auch die Option „Berechnung des wirtschaftlichen Optimums mit einem Doppelwärmeübertrager

mit Zwischenkreislauf“ an. Näheres hierzu siehe /9/.

2.5.2.2 Berechnung des wirtschaftlichen Optimums

Beim Einsatz von Gegenstrom-Wärmeübertragern errechnet sich die mittlere Temperaturdifferenz wie folgt /9/:

$$\Delta t_m = \frac{t_{11} - t_{22} - t_{12} + t_{21}}{\ln \frac{t_{11} - t_{22}}{t_{12} - t_{21}}} \quad (10)$$

Aus Gleichung (1), (2), (3) und (10) erhält man die folgende Gleichung:

$$t_{22} = \frac{t_{11}(e^C - 1) + t_{21}e^C(B - 1)}{Be^C - 1} \quad \text{mit} \quad C = \frac{Ak(B - 1)}{\dot{m}_2 c_2}; \quad B = \frac{\dot{m}_2 c_2}{\dot{m}_1 c_1}; \quad (11)$$

Gleichung (11) stellt t_{22} in Abhängigkeit von der Wärmeübertragerfläche A dar.

Ist eine Wärmeübertragung von der Quelle zur Senke grundsätzlich möglich ($t_{11} > t_{21}$) existieren unendlich viele Möglichkeiten, die Wärmeübertragerfläche zu wählen. Gleichung (11) stellt die Ausgangsgleichung für die energetische und wirtschaftliche Optimierung des Wärmeübertragers dar. Die Optimierung erfolgt iterativ nach folgenden Überlegungen:

In Bild 2.5-2 ist rein qualitativ die Abhängigkeit der zu erwartenden Kapitalrücklaufzeit von der Tauscherfläche aufgetragen. Es gelten folgende Randbedingungen:

- Nähert sich die Tauscherfläche dem Nullpunkt, geht die Kapitalrücklaufzeit gegen unendlich, da die flächenunabhängigen Fixkosten des Wärmeübertragers bestehen bleiben und die Erträge aus der rückgewonnenen Energie gegen null gehen
- Geht die Tauscherfläche gegen unendlich, geht die Kapitalrückflusszeit ebenfalls gegen unendlich

Das wirtschaftliche Optimum, die minimale Kapitalrückflusszeit, wird per Intervallschachtelung ermittelt.

Je nach Lage dieses Minimums kann es im wirtschaftlichen Interesse des Betreibers des Wärmeübertragers sein, die Fläche des Wärmeübertragers über die Fläche der minimalen Kapitalrückflusszeit hinaus zu vergrößern. Dies ist dann der Fall, wenn die Vergrößerung noch Kapitalrückflusszeiten erbringt, die der Betreiber zu akzeptieren bereit ist. Der Nutzer des Programmes kann eine maximale Kapitalrückflusszeit eingeben. Er erhält dann die Wärmeübertragerfläche, die dieser Kapitalrückflusszeit rechts vom Minimum entspricht. Da für bestimmte Anwendungsfälle die Gefahr besteht, dass einer Erhöhung der Wärmeübertragerfläche keine oder keine nennenswert erhöhte Energieübertragung gegenübersteht, wurde zur Verhinderung energetisch und wirtschaftlich unsinniger Ergebnisse ein Abbruchkriterium eingeführt. Der Nutzer kann eingeben, bis zu welcher Mindestmenge an zusätzlich übertragener Energie die Tauscherfläche weiter erhöht werden darf. (Q_{\min}/a pro weiterem m^2 Wärmeübertragerfläche)

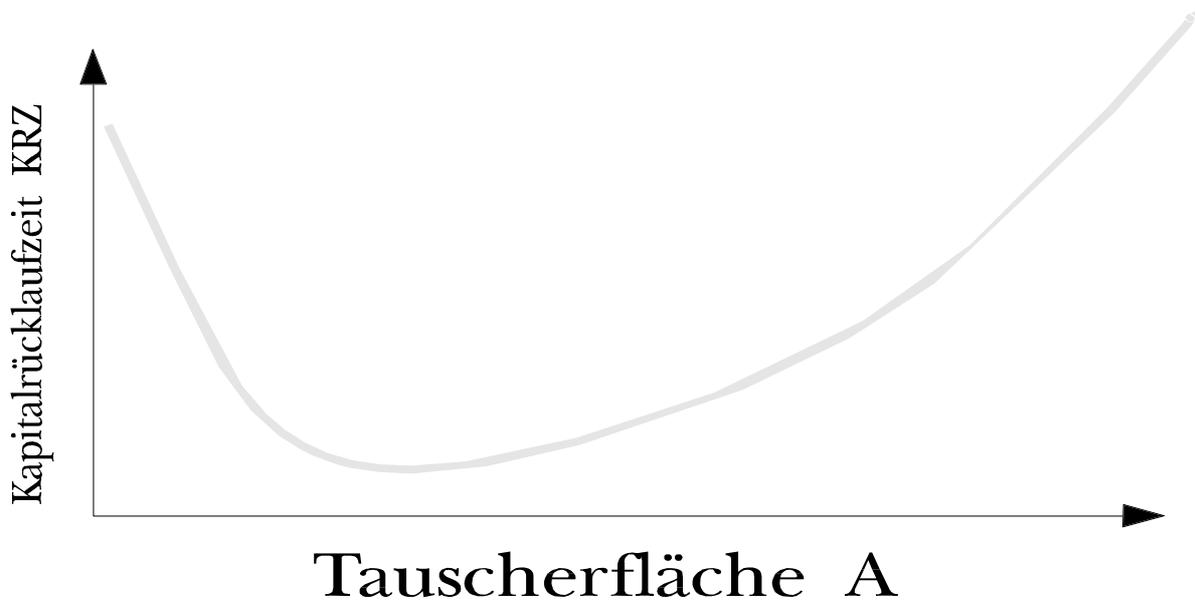


Bild 2.5-2: Qualitative Abhängigkeit der zu erwartenden Kapitalrücklaufzeit von der Tauscherfläche /9/

Die Berechnung der Kapitalrückflusszeit erfolgt nach der Annuitätenmethode /9/:

$$n = \frac{\log(E) - \log(E - K_0(q - 1))}{\log(q)}$$

$$q = \frac{1 + p / 100}{1 + r / 100}$$

mit

n	Kapitalrückflusszeit	[a]
E	Einsparung (eingesparte Kosten abzügl. Mehraufwendungen)	[DM/a]
K_0	Anfangsausgabe (Investition)	[DM]
p	Zinssatz	[%]
r	Teuerungsrate	[%]

Der Betrag für E errechnet sich wie folgt:

$$E = Q_{Senke} p_{konv} - Q_{Zusatz} p_{zus} - W_{el} p_{el} - K_{Wartung \& Instandhaltung}$$

mit:

Q_{Senke}	Jahresenergieverbrauch der Senke	[kWh/a]
p_{konv}	Energiepreis konventionelle Energieversorgung	[DM/kWh]
Q_{Zusatz}	Energiebedarf, der vom Wärmeübertrager nicht zur Verfügung gestellt werden kann	[kWh/a]
p_{zus}	Energiepreis der zusätzlichen Energieversorgung	[DM/kWh]
W_{el}	Hilfsenergiebedarf	[kWh/a]
p_{el}	Energiepreis Hilfsenergie	[DM/kWh]
$K_{Wartung \& Instandhaltung}$	Kosten der Wartung und Instandhaltung	[DM/a]

Je nach der Energieversorgungsstruktur des Betriebes kann die Lieferung der von der Wärmequelle nicht bereitgestellten Energie mit höheren spezifischen Kosten verbunden sein als vor Inbetriebnahme der Wärmerückgewinnung (z. B. schlechtere Auslastung des

Wärmeerzeugers). Dies kann durch die Eingabe eines höheren Energiepreises (p_{zus}) berücksichtigt werden.

Liegen Wärmequelle und Wärmesenke nicht in direkter Nachbarschaft, kann die Entfernung zwischen beiden erheblichen Einfluss auf das Ergebnis haben. Die wesentlichen Einflussfaktoren sind hierbei:

- Investitionen für Rohrleitungen und Transportvorrichtungen
- Wärmeverluste beim Transport
- Energiebedarf für den Transport

Die Wärmeverluste beim Transport werden im Programm, abhängig davon, ob die Rohre in der Erde oder oberirdisch verlegt sind, berücksichtigt. Bei der Auslegung der Wärmedämmung orientiert sich das Programm an den in der Heizungsanlagenverordnung vorgeschriebenen Dicken der Wärmedämmung. Die Werte können jedoch auch anderen Bedürfnissen angepasst werden.

Bei der Auslegung von Rohrdurchmesser und Zirkulationspumpe orientiert sich das Programm am größten von der Senke benötigten Massenstrom. Bei der Berechnung der zum Transport benötigten Energie wird von einer Drehzahlregelung der Pumpe ausgegangen. Die pro Meter Rohrleitung (abhängig vom Durchmesser) und pro kW Pumpenleistung notwendigen Investitionen sind voreinstellbar.

2.5.3 Programmtechnische Ausgestaltung

Das Programm benötigt als Eingangsdaten die Intervallmittelwerte von Temperatur und Leistung aller Wärmequellen und –senken über den gesamten Betrachtungszeitraum. Die Dateneingabe erfolgt entsprechend Kapitel 2.4.4.4.

Vor dem Start der Berechnungen müssen diverse Festlegungen bezüglich einzelner Komponenten der Wärmerückgewinnungsanlage und möglicher Optionen getroffen werden:

Wärmeübertrager

Es müssen die folgenden Wärmeübertragerdaten eingegeben werden:

- der Wärmedurchgangskoeffizient der Tauscherfläche k
- die Flächenkosten in DM/m², wobei zwischen Fixkosten und von der Tauscherfläche abhängigen Kosten unterschieden wird
- der Druckabfall, den der Wärmeträger im Wärmeübertrager erfährt
- die Grädigkeit des Wärmeübertragers

Die Grädigkeit beschreibt die minimale Temperaturdifferenz zwischen den beiden Seiten des Wärmeübertragers. Ihre Vorgabe dient als Abbruchkriterium, um zu verhindern, dass das Programm mit unsinnig großen Wärmeübertragerflächen rechnet.

Das Programm ermöglicht es dem Benutzer, die Daten einer Vielzahl unterschiedlicher Wärmeübertrager in eigenen Dateien abzuspeichern. Vor der Berechnung muss nur der gewünschte Wärmeübertrager ausgewählt werden, seine spezifischen Daten müssen aber nicht eingegeben werden. Bei der Kopplung von Wärmequelle und Wärmesenke

über zwei Wärmeübertrager mit Zwischenkreislauf wird davon ausgegangen, dass beide Wärmeübertrager vom gleichen Typ sind.

Wärmeträgermedium

Auch die Daten der Wärmeträgermedien werden jeweils in einer eigenen Datei gespeichert. Zu diesen Daten gehören die Dichte des Mediums, die Wärmekapazität und die maximale Temperatur, auf die das Medium erwärmt werden darf, außerdem die empfohlene Flussgeschwindigkeit des Mediums beim Transport durch Rohrleitungen.

Wärmespeicher

Es besteht in dem Programm auch die Möglichkeit, den Einfluss eines Wärmespeichers zu untersuchen. Diese Option soll die Information liefern, ob der Einsatz eines Wärmespeichers sinnvoll sein könnte.

Die für eine Berechnung mit Wärmespeicher notwendigen Daten können für verschiedene Wärmespeicher abgespeichert werden, es handelt sich hierbei um:

- den Wärmedurchgangskoeffizient der Ummantelung des Wärmespeichers k
- die für den Speicher notwendigen Investitionen in DM/m³, wobei zwischen Fixkosten und von der Speichergröße abhängigen Kosten unterschieden wird
- die Wärmekapazität und Dichte des Speichermediums
- die maximale Temperatur, auf die der Speicher aufgeladen werden darf

Berücksichtigung der Entfernung zwischen Quelle und Senke

Sowohl bei der Ermittlung der durch eine Maßnahme übertragbaren Energie als auch bei den Kosten spielt die Entfernung zwischen Wärmequelle und Wärmesenke eine maßgebliche Rolle. Der Nutzer des Programms muss die Koordinaten aller Quellen und Senken eingeben. Die Entfernung zwischen Quelle und Senke wird vom Programm als Luftlinie aus den Koordinaten berechnet. Die tatsächliche Länge der Leitungstrasse wird von der reinen Luftlinie abweichen. Es besteht programmtechnisch die Möglichkeit, die Luftlinie mit einem von den Gegebenheiten vor Ort abhängenden Faktor multiplizieren zu lassen.

Ausgabe der Ergebnisse

Nach Abschluss der Berechnungen werden die Ergebnisse für alle Quellen-Senken-Kombination entsprechend Bild 2.5-3 ausgegeben.

Gesamtoptimierung

An die Berechnung der einzelnen Quellen-Senken-Kombinationen schließt sich die Gesamtoptimierung an. Aus allen Quellen-Senken-Kombinationen werden Wärmeübertrager-Netzwerke gebildet und das Netzwerk mit der höchsten Energieeinsparung ausgewählt. Es darf jede Quelle und Senke nur einmal belegt sein und die Summe der insgesamt rückgewonnenen Energie muss, bei vorgegebener Kapitalrückflusszeit, maximal sein. Bei einem Betrieb mit 10 Quellen und 10 Senken ergeben sich 100 Möglichkeiten, die Quellen und Senken zu kombinieren. Diese 100 Quellen-Senken-Kombinationen ergeben 10! (über 3,6 Millionen) mögliche Wärmeübertrager-Netzwerke.

Das Programm berechnet die Energieeinsparung aller Wärmeübertrager-Netzwerke und

weist das Netzwerk mit der maximalen Energieeinsparung aus.

Ergebnisse der Berechnung am 25.9.1998 um 12:32 Uhr mit einem Wärmeübertrager und folgenden Parametern:	
Wärmeübertrager	Standardwärmeübertrager 1
Wärmespeicher	Standardwärmespeicher 1
Medium des ZKL	Thermoöl
E _{min} pro zusätzliche 0,001 m ² [kWh]	1,011
Rohre sind im Boden verlegt ?	nein
Energiekosten für konventionelle Wärmeversorgung [DM/kWh]	0,03
Preis zusätzliche Energie [DM/kWh]	0,04
angestrebte max. Kapitalrücklaufzeit [Jahre]	10
Stromkosten für die Pumpe [DM/kWh]	0,25
Investitionskosten für die Pumpe [DM/kW]	300,00
Mindestverbesserung durch einen idealen WS [%]	5
E _{min} pro zusätzliche Wh WS-Kapazität [kWh]	0,001
Mit Wärmespeicher rechnen ?	nein

Quelle : 5 Senke : 6	
Ergebnisse für die minimale KRZ:	
min. KRZ: 6,7 Jahre; A: 28,39 m ² ; Investitionen: 151102 DM; Energie: 48263 kWh	
Pumpengröße: 814 W; Pumpenstrom: 3557 kWh; Rohrdurchmesser: 0.170 m	
Ergebnisse für die angestrebte KRZ:	
KRZ: 10.0 Jahre; A: 43.23 m ² ; Investitionen: 154070 DM; Energie: 48345 kWh	
Pumpengröße: 814 W; Pumpenstrom: 3557 kWh; Rohrdurchmesser: 0.170 m	

Bild 2.5-3: Ausgabe der Ergebnisse /9/

2.6 Rechenbeispiel

Zur Verdeutlichung der bisherigen Überlegungen wird hier ein Beispiel mit konkreten Zahlen durchgerechnet. Als Grundlage dient der Dampferzeuger des Kalksandsteinwerkes aus Kapitel 4.1 für ein beliebiges Intervall.

Einführend wird nur der Dampferzeuger ohne nach- oder vorgeschaltete Wärmerückgewinnungsmaßnahmen betrachtet. Die Benennung der Ein- und Ausgangsgrößen erfolgt entsprechend Bild 2.4-1.

Das dem Dampferzeugermodul nachgeschaltete Modul fordert über den **Ausgang A1** Sattdampf (einer bestimmten Menge mit vorgegebener Temperatur und vorgegebenem Druck) an. Bereits mit Start des Programms wurden für alle Module die Bilanzgrenzen

und Bezugswerte festgelegt. Die Bezugstemperatur beträgt 15 ° C und der Bezugsdruck 1013 mbar; die Intervallzeit liegt bei einer Stunde.

Aus den abgelegten Daten des vorangegangenen Intervalls kann entnommen werden, dass der Kessel sich auf Betriebsdruck befindet, d. h. eine Dampflieferung mit den benötigten Dampfparametern ist möglich.

Aus den vorgegebenen Dampfparametern und Bezugsgrößen kann der Energieinhalt des entnommenen Dampfes berechnet werden. Dies wird hier modulintern mit einem Hilfsprogramm „Dampf Tafel“ durchgeführt. Es ergibt sich ein Energieinhalt von 3,04 MWh. Damit ist der **Ausgang A1** des Dampferzeugermoduls mit folgenden Größen belegt bzw. konnten modulintern folgende Größen berechnet werden:

Ausgang A1	
Belegung	Herkunft der Daten
Medium: Sattedampf	Vorgabe nachgeschaltetes Modul
Temperatur: 208 ° C	Vorgabe nachgeschaltetes Modul
Druck: 18 bar	Vorgabe nachgeschaltetes Modul
Menge: 4 t	Vorgabe nachgeschaltetes Modul
Modulinterne Berechnungen	
Energieinhalt Dampf: 3.040 kWh	E _D

In einem nächsten Schritt erfolgt die Berechnung und Festlegung der Größen von **Ausgang V2** (Abschlammwasser).

Die Menge an Abschlammwasser errechnet sich modulintern aus einer voreinstellbaren linearen Kopplung mit:

- der Dampfmenge von Ausgang A1 in Prozent oder
- der Zeit in kg/h oder in kg nach jeweils x Intervallen.

Bei dem hier untersuchten Werk wurde, wegen der sehr guten Wasserqualität, praktisch nie abgeschlammmt. Zur Verdeutlichung der Berechnungsvorgänge wurde hier beispielhaft für die Kopplung zwischen Dampfbedarf und Abschlammwasser ein Faktor von 0,1 % eingegeben. Damit errechnet sich modulintern ein Bedarf von 4 kg Abschlammwasser pro Stunde mit 208 ° C und 18 bar.

Aus den nun vorliegenden Zustandsgrößen kann der Energieinhalt des entnommenen Abschlammwassers berechnet werden. Dies wird hier modulintern mit einem Hilfsprogramm „Stoffwerte“ durchgeführt. Es ergibt sich ein Energieinhalt von 0,9 kWh.

Damit ist der **Ausgang V2** des Dampferzeugermoduls mit folgenden Größen belegt bzw. konnten modulintern folgende Größen berechnet werden:

Ausgang V2	
Belegung	Herkunft der Daten
Medium: Wasser	Vorgabe bei der Programmierung des Moduls
Temperatur: 208 ° C	Direkte Kopplung mit Ausgang A1
Druck: 18 bar	Direkte Kopplung mit Ausgang A1
Menge: 4 kg	Modulinterne Berechnung
Modulinterne Berechnungen	
Energieinhalt Wasser: 0,9 kWh	E_{AW}

Die über die Ausgänge A1 und V2 entnommenen Dampf- bzw. Wassermengen ergeben zusammen die über den **Eingang E4** zugeführte Menge an Kesselspeisewasser. Die Mengen werden modulintern aufaddiert; hier ergeben sich 4004 kg Kesselspeisewasser.

Nach Auskunft des Kesselwärters und laut eigener Messungen liegt die mittlere Temperatur des aufbereiteten Kesselspeisewassers bei 11 ° C. Das Kesselspeisewasser wird aus einem drucklosen Vorratsbehälter entnommen.

Aus den nun vorliegenden Zustandsgrößen kann der Energieinhalt des zugeführten Kesselspeisewassers berechnet werden. Dies wird hier modulintern mit einem Hilfsprogramm „Stoffwerte“ durchgeführt. Es ergibt sich ein Energieinhalt von -14,5 kWh. Das Minuszeichen ergibt sich durch die über der Wassertemperatur liegende Bezugstemperatur.

Damit ist der **Eingang E4** des Dampferzeugermoduls mit folgenden Größen belegt bzw. konnten modulintern folgende Größen berechnet werden:

Ausgang A1	
Belegung	Herkunft der Daten
Medium: Wasser	Vorgabe bei der Programmierung des Moduls
Temperatur: 11 ° C	Vorgabe bei der Programmierung des Moduls
Druck: 1 bar	Vorgabe bei der Programmierung des Moduls
Menge: 4004 kg	Modulinterne Berechnung
Modulinterne Berechnungen	
Energieinhalt Wasser: -14,5 kWh	E_{KW}

Die Werte von **Ausgang V1** (Oberflächenverluste) werden wie folgt berechnet:

Im vorangegangenen Intervall wurde die Kesseltemperatur am Ende des Intervalls abgespeichert. Da der Kessel in Betrieb war, betrug sie 208 ° C. Die Umgebungstemperatur am Aufstellungsort wird entweder als Mittelwert bei der Programmierung des Moduls eingegeben oder einer Temperaturverlaufsdatei entnommen. Hier wurde ein Mittelwert von 15 ° C (überdachte Aufstellung im Freien) eingegeben.

Die gesamte Oberfläche eines Dampfkessels besteht üblicherweise aus mehreren Teilflächen mit unterschiedlichem Wandaufbau und damit unterschiedlichen Wärmedurchgangskoeffizienten. Die Dicken und die Materialkonstanten der verwendeten Materialien

werden bei Programmierung des Moduls in die folgende Eingabemaske eingegeben:

		Teilfläche		
	Angabe in	1	2	3
Fläche	m ²	85,2	11	4,8
α_{innen}	W/m ² K	4000	4000	4000
Schicht 1 d	m	0,04	0,04	0,04
Schicht 1 λ	W/mK	45	45	45
Schicht 2 d	m	0,1	0,05	
Schicht 2 λ	W/mK	0,04	0,04	
Schicht 3 d	m	0,002	0,002	
Schicht 3 λ	W/mK	45	45	
$\alpha_{\text{außen}}$	W/m ² K	25	25	25

Die Ermittlung der Werte für obige Matrix ist bis auf die Wärmeübergangskoeffizienten unproblematisch. Diese können ohne erheblichen Zusatzaufwand nur abgeschätzt werden.

Über die Formel:

$$1/k = 1/\alpha_{\text{innen}} + d_1/\lambda_1 + d_2/\lambda_2 + d_3/\lambda_3 + 1/\alpha_{\text{außen}}$$

mit:

k = Wärmedurchgangskoeffizient

α_{innen} = Wärmeübergangskoeffizient Wasser/Kesselstahl

d = Dicke der einzelnen Schichten

λ = Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Schichten

$\alpha_{\text{außen}}$ = Wärmeübergangskoeffizient äußerste Schicht/Luft

wird modulintern der Wärmedurchgangskoeffizient aller Teilflächen berechnet.

Die über die einzelne Teilfläche an die Umgebung abgegebene Wärmemenge errechnet sich modulintern wie folgt:

$$Q = kA\Delta T$$

mit:

Q = Wärmemenge

k = Wärmedurchgangskoeffizient

A = Teilfläche

t = Zeit

ΔT = Temperaturdifferenz innen/außen

Anschließend werden alle Wärmemengen aufaddiert. In diesem Beispiel ergeben sich Oberflächenverluste von 30,6 kWh/h.

Zur Berechnung der Verluste bei Kesselstillstand und der daraus folgenden Kesseltemperatur bei Intervallende gibt es modulintern zwei Möglichkeiten:

- Eingabe einer gemessenen oder bekannten Abkühlkurve (mit möglichst vielen Stützstellen) oder
- Eingabe der folgenden, ermittelten oder meist geschätzten Werte:
 - Im Kessel verbaute Masse an Stahl

- Im Kessel verbleibende Masse an Kesselspeisewasser
- Im Kessel verbleibende Masse an Dampf
- Durch den Kessel bei Betriebstemperatur ziehender Volumenstrom an Falschluff (sollte bei einem modernen Kessel bei annähernd null liegen) und dessen Temperatur nach dem Kessel
- Dampfverluste über die Dampfleitung (sollte bei einem modernen Kessel bei annähernd null liegen)

Da sich der betrachtete Dampferzeuger während des Intervalls in Betrieb befindet, wird auf die Berechnung der Stillstandsverluste hier nicht näher eingegangen.

Damit ist der **Ausgang V1** des Dampferzeugermoduls mit folgenden Größen belegt bzw. konnten modulintern folgende Größen berechnet werden:

Ausgang V1	
Belegung	Herkunft der Daten
Medium: ohne	Vorgabe bei der Programmierung des Moduls
Temperatur: ohne	Vorgabe bei der Programmierung des Moduls
Druck: ohne	Vorgabe bei der Programmierung des Moduls
Menge: ohne	Vorgabe bei der Programmierung des Moduls
Modulinterne Berechnungen	
Oberflächenverluste Kessel: 30,6 kWh	
Oberflächenverluste: el. Anlagen 20,7 kWh	(Berechnung siehe unten)
Oberflächenverluste gesamt: 51,3 kWh	E_{OV}

Durch Messungen des Stromeinsatzes bei unterschiedlicher Dampfernahme konnte ein lastunabhängiger (1,5 kW) und ein lastabhängiger (4,8 kW pro t_{Dampf}/h) Strombedarf ermittelt werden. Außerdem wurde vereinfachend angenommen, dass die gesamte aufgenommene Energie anschließend diffus an die Umgebung abgegeben wird. Hierbei handelt es sich mit Sicherheit nur um eine grobe Näherung an die tatsächlichen Verhältnisse. Für exaktere Betrachtungen kann ein Dampferzeugermodul mit zusätzlichem Pumpenmodul (Kesselspeisewasser) und Gebläsemodul (Verbrennungsluft) definiert werden, bei dem die durch Druckerhöhung und Reibung an Verbrennungsluft und Kesselspeisewasser übertragene Energie berücksichtigt wird.

Bei der hier durchgeführten vereinfachten Betrachtung (über eine Stunde) erhält man bei einem Kesselspeisewasserbedarf von 4,004 t einen Bedarf an elektrischer Energie von 20,7 kWh. Die daraus resultierenden thermischen Verluste werden dem Verlustausgang V1 (Oberflächenverluste) zugeschlagen.

Der **Eingang E2** des Dampferzeugermoduls ist mit folgenden Größen belegt bzw. konnten modulintern folgende Größen berechnet werden:

Eingang E2	
Belegung	Herkunft der Daten
Medium: Elektrische Energie	Vorgabe bei der Programmierung des Moduls
Modulinterne Berechnungen	
Zugeführte el. Energie: 20,7 kWh	E _{el}

Zur Berechnung des Erdgaseinsatzes wird modulintern die Energiebilanz des Dampferzeugers aufgestellt:

$$E_{\text{Erdgas}} + E_{\text{el}} + E_{\text{VL}} + E_{\text{KW}} = E_{\text{OV}} + E_{\text{AW}} + E_{\text{D}} + E_{\text{RG}} \quad (2.6/1)$$

mit:

E_{Erdgas} = Energieinhalt zugeführtes Erdgas (unbekannt)

E_{el} = Energieinhalt zugeführte el. Energie (20,7 kWh)

E_{VL} = Energieinhalt zugeführte Verbrennungsluft (unbekannt)

E_{KW} = Energieinhalt zugeführtes Kesselspeisewasser (-14,5 kWh)

E_{OV} = Oberflächenverluste (51,3 kWh)

E_{AW} = Energieinhalt abgeführtes Abschlämmwasser (0,9 kWh)

E_{D} = Energieinhalt abgeführter Dampf (3040 kWh)

E_{RG} = Energieinhalt abgeführte Rauchgase (unbekannt)

Sortiert man in der Energiebilanzgleichung die unbekannt Summanden nach links und verrechnet man die bereits bekannten Summanden, erhält man für das betrachtete Intervall:

$$E_{\text{Erdgas}} + E_{\text{VL}} - E_{\text{RG}} = 3086 \text{ kWh} \quad (2.6/2)$$

Die drei Unbekannten in obiger Gleichung können wie folgt beschrieben werden:

$$E_{\text{Erdgas}} = V_{\text{Erdgas}} H_u \quad (2.6/3)$$

mit:

V_{Erdgas} = Eingesetztes Normvolumen Erdgas (unbekannt)

H_u = Heizwert des eingesetzten Erdgases (10,0 kWh/Nm³)

$$E_{\text{VL}} = v_{\text{VL}} V_{\text{Erdgas}} \lambda \rho_{\text{VL}} c_{\text{VL}} (T_{\text{VL}} - T_{\text{Bezug}}) \quad (2.6/4)$$

mit:

v_{VL} = Luftbedarf für $\lambda = 1$ (9,56 Nm³/Nm³)

λ = Luftzahl (1,15 aus Messungen bekannt, konstant über den gesamten Leistungsbereich)

ρ_{VL} = Dichte der Verbrennungsluft (wird modulintern mit dem Hilfsprogramm „Stoffwerte“ ermittelt)

c_{VL} = spezifische Wärmekapazität der Verbrennungsluft (wird modulintern mit dem Hilfsprogramm „Stoffwerte“ ermittelt)

T_{VL} = Temperatur der Verbrennungsluft (gleich mit T_{Bezug})

T_{Bezug} = Bezugstemperatur (15° C)

$$E_{RG} = V_{RG} V_{Erdgas} \lambda \rho_{RG} c_{RG} (T_{RG} - T_{Bezug}) \quad (2.6/5)$$

mit:

V_{RG} = Abgasvolumen für $\lambda = 1$ (10,4 Nm³/Nm³)

ρ_{RG} = Dichte der Rauchgase (wird modulintern mit dem Hilfsprogramm „Stoffwerte“ ermittelt)

c_{RG} = spezifische Wärmekapazität der Rauchgase (wird modulintern mit dem Hilfsprogramm „Stoffwerte“ ermittelt)

T_{RG} = Temperatur des Rauchgases (bekannt, Näheres siehe unten)

Während der Betriebsuntersuchung wurden mehrere Wertepaare von Dampferzeugerleistung und Rauchgastemperatur aufgenommen. Aus diesen Wertepaaren wurde modulintern eine Regressionskurve berechnet, aus der wiederum für die Dampferzeugerleistung in diesem Intervall (4 t/h) eine Rauchgastemperatur von 270 ° C entnommen wurde.

Setzt man die Gleichungen 2.6/3, 4 und 5 in Gleichung 2.6/2 ein und löst man die Gleichung nach der einzigen Unbekannten (V_{Erdgas}) auf, erhält man:

$$V_{Erdgas} (H_u + v_{VL} \lambda \rho_{VL} c_{VL} (T_{VL} - T_{Bezug}) - v_{RG} \lambda \rho_{RG} c_{RG} (T_{RG} - T_{Bezug})) = 3086 \text{ kWh} \quad (2.6/6)$$

Es ergibt sich ein Erdgasbedarf von 347,1 Nm³ bzw. 3471 kWh (mit Gleichung 2.6/3).

Damit ist der **Eingang E1** des Dampferzeugermoduls mit folgenden Größen belegt bzw. konnten modulintern folgende Größen berechnet werden:

Eingang E1	
Belegung	Herkunft der Daten
Medium: Erdgas	Vorgabe bei der Programmierung des Moduls
Temperatur: Normbedingungen	Vorgabe bei der Programmierung des Moduls
Druck: Normbedingungen	Vorgabe bei der Programmierung des Moduls
Menge: 347,1 Nm ³	Modulinterne Berechnung
Modulinterne Berechnungen	
Energieinhalt zugeführtes Erdgas: 3471 kWh	E_{Erdgas}

Modulintern kann aus Gleichung 2.6/4 und dem Erdgaseinsatz der Bedarf an Verbrennungsluft berechnet werden:

$$V_{VL} = v_{VL} V_{Erdgas} \lambda$$

mit:

v_{VL} = Benötigte Verbrennungsluftmenge

v_{VL} = Luftbedarf für $\lambda = 1$ (9,56 Nm³/Nm³)

λ = Luftzahl (1,15 aus Messungen bekannt, konstant über den gesamten Leistungsbereich)

Damit ist der **Eingang E3** des Dampferzeugermoduls mit folgenden Größen belegt bzw. konnten modulintern folgende Größen berechnet werden:

Eingang E3	
Belegung	Herkunft der Daten
Medium: Luft	Vorgabe bei der Programmierung des Moduls
Temperatur: 15 ° C	Vorgabe bei der Programmierung des Moduls
Druck: 1013 mbar	Vorgabe bei der Programmierung des Moduls
Menge: 3816 Nm ³	Modulinterne Berechnung
Modulinterne Berechnungen	
Energieinhalt zugeführte Verbrennungsluft: 0 kWh	E _{VL}

Modulintern kann außerdem aus Gleichung 2.6/5 und dem Erdgaseinsatz der Energieinhalt der Rauchgase berechnet werden. Über die Beziehung:

$$V_{RG} = v_{RG} V_{Erdgas} \lambda$$

mit:

V_{RG} = Volumenstrom Rauchgas

v_{RG} = Abgasvolumen für $\lambda = 1$ (10,4 Nm³/Nm³)

λ = Luftzahl (1,15 aus Messungen bekannt, konstant über den gesamten Leistungsbereich)

wird der Volumenstrom des Rauchgases berechnet.

Damit ist der **Ausgang A2** des Dampferzeugermoduls mit folgenden Größen belegt bzw. konnten modulintern folgende Größen berechnet werden:

Ausgang A2	
Belegung	Herkunft der Daten
Medium: Rauchgas	Vorgabe bei der Programmierung des Moduls
Temperatur: 270 ° C	Modulinterne Berechnung
Druck: knapp unter Umgebungsdruck	Vorgabe bei der Programmierung des Moduls
Menge: 4151 Nm ³	Modulinterne Berechnung
Modulinterne Berechnungen	
Energieinhalt Rauchgase: 385,3 kWh	E _{RG}

Damit ist der Berechnungsvorgang für das Dampferzeugermodul für das betrachtete Intervall abgeschlossen.

In einer weiteren Betrachtung wird davon ausgegangen, dass dem Dampfkessel vorgewärmtes Kesselspeisewasser zugeführt wird. Die Vorwärmung erfolgt, wie in Bild 4.1-5 dargestellt, über eine vorgeschaltete Wärmerückgewinnung aus Kondensat und Abdampf und anschließend durch die Rauchgase des Dampfkessels.

Die vorgeschaltete Wärmerückgewinnung aus Kondensat und Abdampf stellt keine besonderen Anforderungen an das Rechenprogramm. Bei der Berechnung der Ein- und Ausgangsgrößen der Module Dampfkessel und ECO wird bei einem Schritt die Temperatur des vorgewärmten Kesselspeisewassers am ECO fehlen. Die Menge an Kessel-

speisewasser ist zu diesem Zeitpunkt bereits bekannt. Das Rechenprogramm hat die Berechnungen ursprünglich bei den Härtekesselmodulen gestartet und sich in Richtung Dampfkesselmodul modulweise vorgearbeitet. Diese Berechnungen werden mit dem Bekanntwerden einer fehlenden Größe gestoppt. Das Rechenprogramm beginnt nun, in Richtung des Moduls mit der fehlenden Größe zu rechnen. Hierbei handelt es sich um den Entspannungsbehälter und die nachgeschaltete Wärmerückgewinnung. Sobald die fehlende Größe vorliegt, werden die Berechnungen an der alten Stelle wieder aufgenommen.

Bei der anschließenden Erwärmung des Kesselspeisewassers durch die Rauchgase im ECO tritt eine Berechnungsschleife auf:

- Die Temperatur des Kesselspeisewassers ist eine der Berechnungsgrößen für den Erdgaseinsatz
- Der Erdgaseinsatz ist wiederum direkt mit der Rauchgasmenge gekoppelt
- Die Rauchgasmenge ist eine der Berechnungsgrößen für die Temperatur des Kesselspeisewassers

Bei Berechnungsschleifen werden die Berechnungen von zwei Modulen gekoppelt.

Es kann auf die bisherigen Überlegungen aufgebaut werden. Gleichung 2.6/1 weist eine unbekannte Größe (E_{KW} = Energieinhalt zugeführtes Kesselspeisewasser) mehr auf.

Damit stellt sich Gleichung 2.6/2 wie folgt dar:

$$E_{\text{Erdgas}} + E_{\text{VL}} - E_{\text{RG}} + E_{\text{KW}} = 3071,5 \text{ kWh} \quad (2.6/7)$$

Daraus folgt die geänderte Gleichung 2.6/6:

$$V_{\text{Erdgas}} (H_u + v_{\text{VL}} \lambda \rho_{\text{VL}} c_{\text{VL}} (T_{\text{VL}} - T_{\text{Bezug}}) - v_{\text{RG}} \lambda \rho_{\text{RG}} c_{\text{RG}} (T_{\text{RG}} - T_{\text{Bezug}})) + m_{\text{KW}} c_{\text{KW}} (T_{\text{KW}} - T_{\text{Bezug}}) = 3086 \text{ kWh} \quad (2.6/8)$$

Die Gleichung 2.6/8 enthält zwei Unbekannte, V_{Erdgas} (den Volumenstrom Erdgas) und T_{KW} (die Temperatur des Kesselspeisewassers beim Eintritt in den Dampferzeuger).

Die Temperatur des Kesselspeisewassers kann über die Wärmeübertragergleichungen (hier speziell Gleichung 11 auf Seite 38) als Funktion von bekannten Größen des Wärmeübertragers und dem Erdgasvolumenstrom dargestellt werden. Setzt man die nach T_{KW} aufgelöste Gleichung 11 (dort t_{22}) in Gleichung 2.6/8) ein, verbleibt dort nur die Unbekannte V_{Erdgas} , allerdings nur in einer schwer auflösbaren Form, da die Unbekannte sowohl als Multiplikator als auch als Exponent einer e-Funktion auftritt.

Die Gleichung wird an Hand eines Hilfsprogramms mit Hilfe einer Intervallschachtelung gelöst. Sobald der Wert für V_{Erdgas} vorliegt, können alle sonstigen Größen an Hand bekannter Zusammenhänge berechnet werden.

3 Vergleich mit konventionellen Verfahren und Fehlerrechnung

3.1 Übliche Datenbasis

In jedem Betrieb liegt eine bestimmte Anzahl von Informationen über energierelevante Größen vor. Es gibt keine Untersuchung, wie umfassend diese Informationen im Mittel sind. Aus der bisherigen Erfahrung kann aber gesagt werden, dass es sich nur in den seltensten Fällen um einen vollständigen Satz (über mehrere Jahre) folgender Informationen handelt:

- Die energierelevanten Größen aller Anlagen mit nennenswertem Energieverbrauch (5 % des Energieeinsatzes des gesamten Betriebs oder mehr als 500 MWh/a), mindestens als 1 h-Mittelwerte, gemessen mithilfe von regelmäßig gewarteten und kalibrierten Messeinrichtungen
- Die zeitgleich erfassten Produktionsdaten inklusive der Daten wichtiger Vorprodukte

Theoretisch kann der Wissensstand über den zu untersuchenden Betrieb beliebig verbessert werden. In der Praxis sinkt jedoch die Bereitschaft, ein Energiekonzept erstellen zu lassen, wenn bereits im Vorfeld mit erheblichem zeitlichen und finanziellen Aufwand für die Grundlagenermittlung gerechnet werden muss.

Neben der Möglichkeit einer vergleichsweise kostengünstigen und qualitativ hochwertigen Erstellung eines Energiekonzeptes hätte der Betrieb auch noch weitere Vorteile, wenn er eine Energie- und Produktionsdatenerfassung mit obigem Detaillierungsgrad, zusammen mit einer laufenden Auswertung der Daten, betreiben würde. Die Vorteile wären:

- Bedarfsgerechte und nicht zeitgesteuerte Wartungsintervalle und die damit verbundene Kosteneinsparung
- Erkenntnisse über den Energieeinsatz, auch in Bezug auf die Produktion, mit den damit u. U. verbundenen Reduzierungsmöglichkeiten beim Energieverbrauch oder auch damit verbundenen Steigerungen bei der Produktivität oder Produktqualität
- Frühzeitige Erkennung von sich abzeichnenden Schäden an Anlagenkomponenten
- Möglichkeiten der Laststeuerung und die damit u. U. verbundene Einsparung bei den Leistungspreisen
- Bedarfsgerechte und kostenadäquate Energiekostenabrechnung mit den einzelnen Abteilungen und die damit verbundene vermehrte Bereitschaft der einzelnen Abteilungen, Energie rationeller einzusetzen

Trotz dieser Vorteile wird sich der Bearbeiter eines Energiekonzeptes sehr oft mit einer wesentlich schmaleren Datenbasis abfinden müssen. Der finanzielle Rahmen, der ihm zur Verfügung steht, wird auch nur selten eine messtechnische Nachbesserung dieser Datenbasis erlauben.

3.2 Vergleich mit der konventionellen Erstellung eines Energiekonzeptes

Der Bearbeiter eines konventionellen Energiekonzeptes wird wie folgt vorgehen:

- Ermittlung des Status quo, Datenaufnahme, Datenauswertung, Ergebnisdarstellung der Bestandsaufnahme
- Erarbeitung der Möglichkeiten eines rationelleren Energieeinsatzes, Darstellung einzelner Maßnahmen oder Maßnahmenbündel, Abschätzung der Wirtschaftlichkeit der betrachteten Möglichkeiten, Empfehlungen zum weiteren Vorgehen
- Berichterstattung

Er wird diverse Hilfsprogramme (Tabellenkalkulation, Dampf tafeln, Zeichenprogramme) nutzen, jedoch keine umfassende Rechnerunterstützung zur Verfügung haben.

Verfügt der Bearbeiter über die nötige Erfahrung und über genügend Zeit, wird er, vorausgesetzt, er nutzt alle vorliegenden Daten, auf ein sehr ähnliches Ergebnis kommen wie bei einer Erstellung unter Zuhilfenahme dieses Programms, da mithilfe des Programms weder die Datenbasis vergrößert noch physikalische Zusammenhänge beeinflusst werden können.

Da jedoch meist der Zeit- und Kostenrahmen nicht ausreicht, um die folgenden Forderungen umfassend zu erfüllen:

- Berücksichtigung aller vorliegender Daten und Informationen
- Berücksichtigung aller Möglichkeiten eines rationelleren Energieeinsatzes
- fundierte Erarbeitung der empfohlenen Maßnahmen und Maßnahmenbündel
- fundierte, übersichtliche und nachvollziehbare Berichterstattung

wird der Bearbeiter gezwungen sein, gewisse Abstriche zu machen. Diese können in folgenden Bereichen angesiedelt sein:

- Einige als nebensächlich erscheinende Informationen oder Daten, vor allem diejenigen, die schwierig zu berücksichtigen sind, bleiben außen vor. Dies führt u. U. zu einer recht pauschalen Betrachtung komplexer Vorgänge, obwohl die vorhandenen Daten eine genauere Betrachtung erlaubt hätten
- Mögliche Maßnahmen eines rationelleren Energieeinsatzes, die auf den ersten Blick keine Wirtschaftlichkeit versprechen, werden nicht genauer untersucht. Unterlag man bei dieser ersten Grobabschätzung einer Fehleinschätzung, wird dies wegen der fehlenden genaueren Betrachtung nicht mehr revidiert
- Bei den zu erarbeitenden Maßnahmen und Maßnahmenbündeln werden nur wenige Alternativen und nicht alle sinnvollen Alternativen betrachtet
- Bei der Berichterstellung werden aus Gründen der Zeitersparnis nur wenige grafische Darstellungen verwendet. Doch gerade diese helfen dem Halblaien, als solcher ist der Auftraggeber meist zu betrachten, komplexere Zusammenhänge zu verstehen und auf seinen Betrieb zu beziehen

Häufig wird bei der Datenerhebung bzw. bei der Berücksichtigung vorliegender Daten Zeit eingespart. Hierzu wird ein relativ kurzer Zeitraum, oft nur ein als repräsentativ

angesehener Lastpunkt, zur Bildung von „Mittelwerten“ herangezogen. Diese Mittelwerte, multipliziert mit der Anzahl der Arbeitsstunden und Arbeitstage, ergeben dann die Datenbasis für das Energiekonzept. Hierbei wird eine Fülle von Fehlern in Kauf genommen, die in Kapitel 3.3 näher untersucht werden.

Will man den Zeitaufwand bei der Erstellung eines Energiekonzeptes mit und ohne Rechnerunterstützung vergleichen, muss man sich zuerst vor Augen halten, welche Abläufe durch das Programm beschleunigt oder verlangsamt werden:

Durch das Programm beschleunigte Abläufe:

- Berücksichtigung aller vorliegender Daten
- Änderungen an bereits durchgeführten Berechnungen oder Abschätzungen
- Grafische Darstellungen der Energieanwendungsstruktur und des Energieeinsatzes
- Optimierung der Verknüpfung von Wärmequellen und Wärmesenken
- Berechnung der energetischen und wirtschaftlichen Auswirkungen verschiedener Alternativen eines rationelleren Energieeinsatzes
- Abschätzung der Auswirkungen verschiedener zukünftiger Produktionsprognosen

Faktoren, welche die Bearbeitungszeit verlängern können:

- Einarbeitung in das Programm
- Die Programmierung der einzelnen Anwendungsmodule

Ob es für den konkreten Anwendungsfall mit oder ohne Programm schneller geht, hängt von verschiedenen Faktoren ab:

- Erstbearbeitung eines Betriebes oder einer Anlage:
Soll das Energiekonzept mit geringer Tiefe, d. h. als überschlägige Schnellabschätzung, erarbeitet werden, kann eine Bearbeitung ohne Programm schneller sein. Dieser eventuelle Vorsprung einer Bearbeitung ohne Programm nimmt ab, je tief greifender das Konzept erarbeitet werden soll. Die Erstellung eines mustergültigen Konzepts dürfte sich mit Rechnerunterstützung erheblich schneller gestalten lassen als ohne
- Wiederholung einer Bearbeitung (solange die Struktur des Betriebes weitgehend erhalten bleibt):
Kann in jedem Fall mit Rechnerunterstützung schneller durchgeführt werden, vorausgesetzt, die Erstbearbeitung des Betriebes wurde ebenfalls mit Rechnerunterstützung durchgeführt

3.3 Fehlerbetrachtung

Bei der Erstellung eines Energiekonzeptes gibt es auf verschiedensten Ebenen Fehlermöglichkeiten. Allen ist gemein, dass sie nicht abschätzbar sind, da für eine klassische Fehlerrechnung die notwendigen Daten fehlen und diese auch nicht eruierbar sind:

- Fehler durch Intervallzeiten größer eine Sekunde bis zur Intervallzeit ein Jahr (Mittelwertbildung). Siehe Kapitel 3.3.1
- Fehler durch Vernachlässigung von Anfahrvorgängen. Siehe Kapitel 3.3.2
- Bearbeitungsfehler sind mit und ohne Programm in beliebigem Umfang möglich. Daher wird hier nicht näher darauf eingegangen

3.3.1 Fehlermöglichkeiten über die Mittelwertbildung

Die Berechnungen im Rahmen einer Erstellung eines Energiekonzeptes sind sehr aufwändig, vor allem, wenn die tatsächlichen Verläufe des Energieeinsatzes über längere Zeiträume berücksichtigt werden sollten oder könnten. Daher wird in der Praxis gerne mit Durchschnittswerten gerechnet, auch wenn exakte Messwerte vorliegen. Im Folgenden wurde versucht, den hierbei möglicherweise in Kauf genommenen Fehler an Hand eines Beispiels aufzuzeigen.

In dem Beispiel wird eine Wärmequelle mit einer Wärmesenke verknüpft. Es sollen unter Vorgabe einer maximalen Kapitalrückflusszeit von 4 Jahren die für die Verknüpfung notwendige Wärmeübertragerfläche bestimmt und die pro Jahr rückgewinnbare Energie berechnet werden.

Die Wärmequelle hat einem Tageslastgang wie in Bild 3.3-1 dargestellt. Es wird vereinfachend angenommen, dass exakt dieser Lastgang an allen Arbeitstagen des Jahres vorliegt. Die Temperatur der Wärmequelle liegt bei konstant 240 ° C. Bei der Quelle könnte es sich beispielsweise um die Rauchgase eines Dampferzeugers handeln, der in einem Betrieb mit folgendem, stark geglätteten Produktionsablauf eingesetzt wird:

- Produktionsbeginn 7 Uhr
- Produktionsende 16 Uhr
- Mittagspause von 12 bis 13 Uhr
- nachmittags geringere Intensität beim Energieeinsatz als vormittags

Der Tageslastgang der Senke (Bild 3.3-2) wurde vorerst als konstant angenommen. Es handelt sich um einen Warmwasserbedarf mit 100 ° C und folgender Leistung:

Senke 1: Der Leistungsbedarf liegt um den Faktor 10 über dem mittleren Leistungsangebot der Quelle

Senke 2: Der Leistungsbedarf liegt exakt beim mittleren Leistungsangebot der Quelle

Senke 3: Der Leistungsbedarf liegt um den Faktor 2 unter dem mittleren Leistungsangebot der Quelle

Die Berechnungen wurden mit verschiedenen gemittelten Eingangsdaten durchgeführt. Als Referenz dienten 1-Minuten-Mittelwerte. In Tabelle 3.3-1 ist das Ergebnis, die laut Berechnung rückgewinnbare Energie, angegeben, bezogen auf die tatsächlich rückgewinnbare Energie (laut Referenzfall), in Prozent.

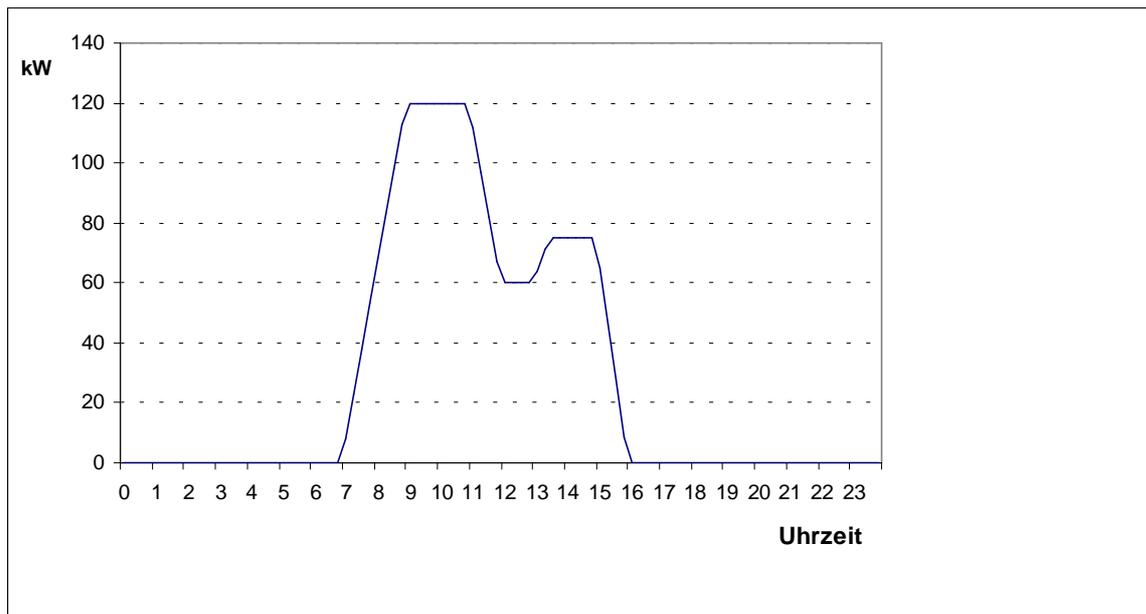


Bild 3.3-1: Tageslastgang der Quelle

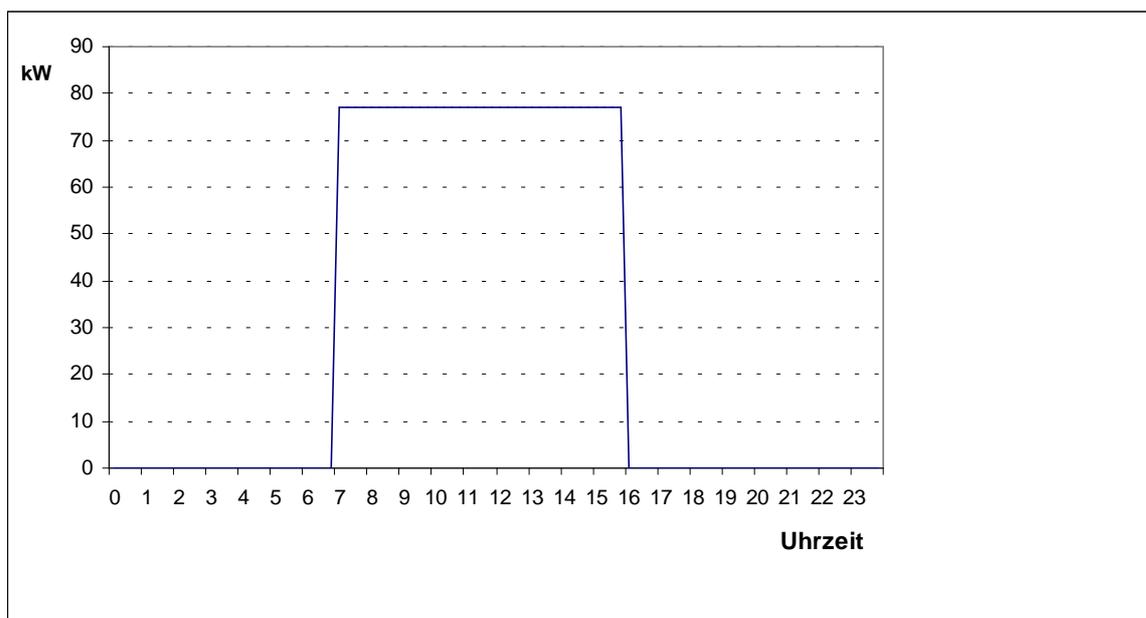


Bild 3.3-2: Tageslastgang der konstanten Senke (hier dargestellt: Senke 2)

Eingabe der Energiedaten der Quelle als	Senke 1	Senke 2	Senke 3
1-Minuten-Mittelwerte Referenzfall	100 %	100 %	100 %
5-Minuten-Mittelwerte	100 %	100 %	100 %
15-Minuten-Mittelwerte	100 %	100 %	100 %
60-Minuten-Mittelwerte	100 %	101 %	104 %
Tagesmittelwert von 7 bis 16 Uhr	100 %	120 %	107 % *)

*)Damit war der Bedarf der Senke vollständig gedeckt

Tabelle 3.3-1: Ergebnisse bei unterschiedlicher Eingabe der Energiedaten der Quelle, in Prozent vom Referenzwert.

In Tabelle 3.3-1 ist mit 100 % die Energiemenge gekennzeichnet, die bei Kombination der Quelle mit der jeweiligen Senke innerhalb der geforderten Kapitalrückflusszeit rückgewonnen werden kann. Bringen Berechnungen - mit über längere Zeiträume gemittelten Daten - Ergebnisse über 100 %, wird dem Investor ein zu gutes Ergebnis versprochen. Im tatsächlichen Einsatz wird er weniger Energie rückgewinnen als vorausberechnet bzw. mit längeren Kapitalrückflusszeiten vorlieb nehmen müssen als gefordert. Dies deckt sich auch mit Erfahrungen aus der Praxis. Oft halten Wärmeübertrager die Garantiewerte ein, erbringen jedoch über das Jahr weniger Energieeinsparung als erwartet.

Als Ergebnis lässt sich für das obige Beispiel Folgendes festhalten:

- Der Rechenfehler lag bei unter 0,5 % wenn statt 1-Minuten-Mittelwerten 5- oder 15-Minuten-Mittelwerte verwendet wurden
- Lag der Leistungsbedarf der Senke erheblich über dem Leistungsangebot der Quelle (Senke 1) war selbst bei einer Berechnung mit Tagesmittelwerten kein nennenswerter Rechenfehler zu verzeichnen
- Lag der Leistungsbedarf der Senke bei oder unter dem Leistungsangebot der Quelle, treten bei einer Berechnung mit 60-Minuten-Mittelwerten erste Fehler auf, bei einer Berechnung mit Tagesmittelwerten lag der Fehler bei bis zu 20 %

Bis jetzt wurde von einem konstanten Verlauf des Leistungsbedarfs der Senken ausgegangen. Um die Bandbreite der Fehlermöglichkeiten aufzuzeigen, wurden im Folgenden Senken mit im Verhältnis zu den Quellen gegenläufigem Lastgang nach Bild 3.3-3 zu Grunde gelegt.

Die mittlere Leistung der drei Senken entspricht derjeniger obiger Senken 1, 2 und 3.

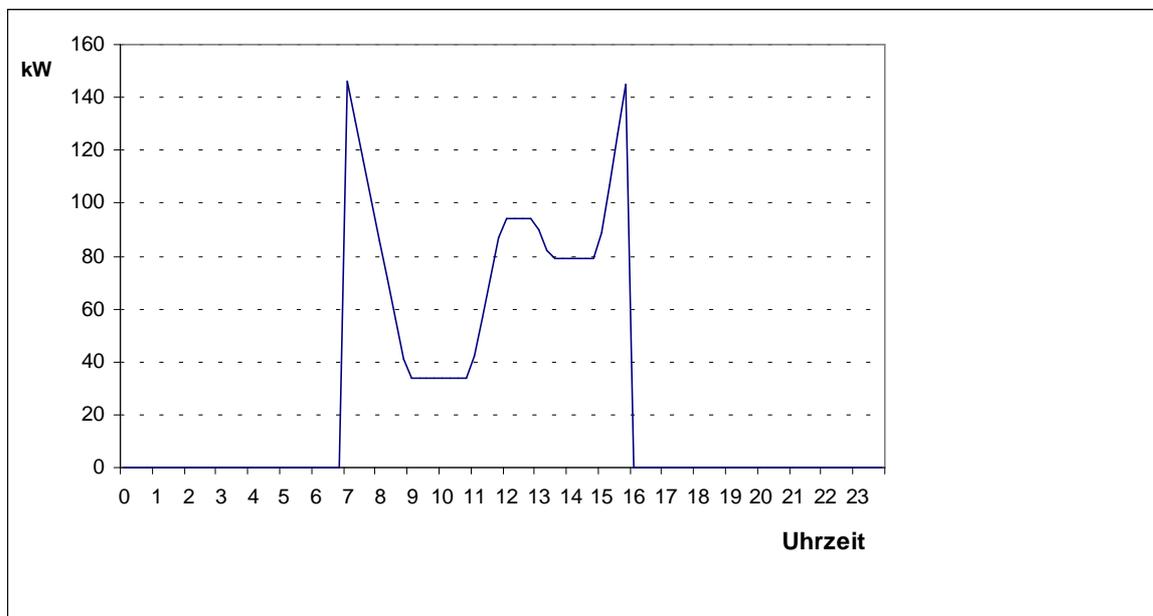


Bild 3.3-3: Tageslastgang der gegenläufigen Senke (hier dargestellt: Senke 2)

Auch hier wurden, entsprechend dem obigen Vorgehen, die drei Senken mit der Quelle

verknüpft und die Ergebnisse für verschiedene Mittelwertbildungen bei der Dateneingabe in Tabelle 3.3-2 gegenübergestellt. Hier bildet eine Berechnung den Referenzfall, bei der die Energiedaten als 15-Minuten-Mittelwerte eingegeben wurden.

Dateneingabe	Senke 1	Senke 2	Senke 3
Quelle und Senke als 15-Minuten-Mittelwerte Referenzwert	100 %	100 %	100 %
Quelle als Tagesmittelwert 7 bis 16 Uhr Senke als 15-Minuten- Mittelwerte	100 %	124 %	114 %
Quelle und Senke als Tagesmittelwert 7 bis 16 Uhr	100 %	139 %	130 %

Tabelle 3.3-2: Ergebnisse bei unterschiedlicher Eingabe der Energiedaten in Prozent vom Referenzwert

Auch hier ergaben sich ähnliche Ergebnisse wie beim vorangegangenen Beispiel:

- keine relevanten Fehler, wenn der Leistungsbedarf der Senke erheblich höher ist als das Leistungsangebot der Quelle
- bis zu 24 % Fehler, wenn der Leistungsbedarf der Senke unter oder bei dem Leistungsangebot der Quelle liegt, wenn bei der Quelle zur Berechnung die Tagesmittelwerte herangezogen werden
- bis zu knapp 40 % Fehler, wenn sowohl bei der Quelle als auch bei der Senke zur Berechnung die Tagesmittelwerte herangezogen werden

Die hier aufgeführten Beispiele sind nicht verallgemeinerbar. Sie liefern jedoch einen deutlichen Hinweis, dass eine Berechnung von Wärmeübertragern mit Tagesmittelwerten problematisch sein kann, vor allem dann, wenn:

- Quelle und Senke einen sehr unterschiedlichen oder gar gegenläufigen Lastgang aufweisen
- der mittlere Leistungsbedarf der Senke sich weniger als um den Faktor 2-3 vom mittleren Leistungsangebot der Quelle unterscheidet

Obige Überlegungen beziehen sich nur auf eine Mittelwertbildung bei der Leistung von Quelle und Senke. Ähnliche Fehlerquellen sind zu erwarten, wenn stark schwankende Temperaturverläufe durch Mittelwertbildung „begradigt“ werden.

3.3.2 Fehlermöglichkeiten durch das Vernachlässigen von Anfahrvorgängen

Neben dem Rechnen mit Mittelwerten kann durch das Ignorieren des Energieeinsatzes in Verbindung mit Anfahrvorgängen ein weiterer, u. U. nennenswerter Fehler auftreten. Hierunter wird jeglicher Energieeinsatz verstanden, der dazu dient, eine Anlage auf den für die Produktion notwendigen energetischen Status zu bringen.

Die größten Fehler sind zu erwarten, wenn es sich hierbei um thermische Vorgänge han-

delt, also wenn der Anlage Wärme zugeführt oder auch entzogen werden muss.

Der Anteil der Energie, der für Anfahrvorgänge aufgewendet werden muss, an der gesamten, in der Anlage pro Jahr umgesetzten Energie, hängt im Wesentlichen von den folgenden Faktoren ab:

- Masse der Anlage und der enthaltenen Hilfsmittel (z. B. Ofenwägen) oder Stoffe (z. B. Wasser im Dampfkessel)
- Temperaturdifferenz zur Umgebung bei Solltemperatur
- Verhältnis Stillstandszeit zur Betriebszeit der Anlage
- Durchsatz der Anlage
- Qualität der Wärmedämmung

Der Anteil schwankt naturgemäß in weiten Bereichen zwischen annähernd 0 % bei Anlagen, die praktisch rund um die Uhr betrieben werden bis zu mehreren 100 % bei Anlagen, die selten zur Produktion kleiner Chargen eingesetzt werden. Im Folgenden einige Beispiele aus der Praxis:

- ca. 0 % bei Aluminiumelektrolyseöfen, die rund um die Uhr in Betrieb sind
- ca. 2 % bei einem 5 MW Dampfkessel, der an den Werktagen 16 Stunden lang betrieben wird
- ca. 25 % bei einem 0,2 MW Schnelldampferzeuger, der an den Werktagen 3 Stunden lang betrieben wird
- ca. 4 % bei einem Brösel Trockner mit 100 ° C Trockentemperatur, der an Werktagen für 8 Stunden betrieben wird
- ca. 15 % bei Backöfen mit 200 ° C Backtemperatur, die an Werk- und Samstagen für 8 Stunden betrieben werden
- ca. 32 % bei Backöfen mit 300 ° C Backtemperatur, die an Werk- und Samstagen für 8 Stunden betrieben werden

Im Zusammenhang mit den Anfahrvorgängen gibt es zwei grundlegende Fehlermöglichkeiten:

- Es besteht immer die Gefahr, dass der Energieverbrauch zum Anfahren beim Bestimmen der mittleren Leistung der Anlage während der Produktionszeiten mit herangezogen wird und damit die mittlere Leistung während der Betriebszeiten zu hoch ausfällt
- Bei Maßnahmen, die auch auf eine Reduzierung des Energieeinsatzes während der Anfahrzeiten abzielen (z. B. Verbrennungsluftvorwärmung mittels der Rauchgase), fällt, bei Vernachlässigung des Anfahrvorganges, die rückgewinnbare Energie entsprechend geringer aus

3.4 Überlegungen zur möglichen Genauigkeit bei der Betrachtung bzw. energetischen Einschätzung einzelner Anlagen oder Betriebe

Die energetischen Vorgänge innerhalb einer Anlage oder eines Betriebes und ihre Auswirkungen auf die austretenden Energieströme sind oft nur zum Teil bekannt.

Bei der klassischen Konzepterstellung legt sich der Bearbeiter ein Modell zurecht, in das identifizierte oder vermutete Zusammenhänge zwischen den einzelnen Größen Eingang finden, insofern:

- diese Zusammenhänge als relevant erachtet werden
- die Datenlage entsprechende Zusammenhänge stützt

Beispielsweise kann bei einem Dampferzeuger für manche Betrachtungen vereinfachend angenommen werden, dass die Rauchgastemperatur unabhängig von der Kessellast konstant ist. Bei genaueren Betrachtungen, z. B. im Rahmen einer Abschätzung der Rentabilität einer Verbrennungsluftvorwärmung mittels der Rauchgase, kann es nötig sein, die Abhängigkeit genauer zu untersuchen.

Beim Programm wird das in jedem Fall notwendige Modell an Hand der Verknüpfung mehrerer Module gebildet.

Sowohl bei der klassischen als auch bei der rechnergestützten Konzepterstellung stellt sich die Frage, wie genau das Modell die Wirklichkeit abbilden muss. Von Seiten des Betreibers der untersuchten Anlage werden meist maximale Kapitalrückflusszeiten vorgegeben. In Tabelle 3.4-1 wird aufgeführt, wie die tatsächlichen Kapitalrückflusszeiten von den vorgegebenen abweichen, wenn die tatsächlich eingesparte Energie von der berechneten Energieeinsparung abweicht.

Abweichung der tatsächlich eingesparten Energiemenge von der berechneten Energieeinsparung +/- %	Vorgabe 2 Jahre Kapitalrückflusszeit		Vorgabe 3 Jahre Kapitalrückflusszeit		Vorgabe 4 Jahre Kapitalrückflusszeit	
	Tatsächliche Kapitalrückflusszeit		Tatsächliche Kapitalrückflusszeit		Tatsächliche Kapitalrückflusszeit	
	a	a	a	a	a	a
0	2,0	2,0	3,0	3,0	4,0	4,0
5	1,9	2,1	2,8	3,1	3,8	4,2
10	1,8	2,2	2,6	3,3	3,6	4,5
15	1,7	2,4	2,5	3,6	3,4	4,8
20	1,6	2,6	2,4	3,9	3,2	5,2
30	1,5	3,0	2,2	4,5	2,9	6,2
40	1,4	3,6	2,0	5,5	2,7	7,7

Alle Kapitalrückflusszeiten inkl. 6 % Kapitalverzinsung und inkl. Wartung und Instandhaltung

Tabelle 3.4-1: Veränderung der tatsächlichen Amortisationszeiten bei Abweichungen von der berechneten Energieeinsparung

Ein Fehler unter 10 % bei der Berechnung der Energieeinsparung hat sehr geringe Auswirkungen auf die tatsächlichen Amortisationsdauern; ein Fehler unter 15 % dürfte von vielen Betreibern noch problemlos akzeptiert werden; bei Fehlern über 20 % verlängert sich die Amortisationszeit bereits um ca. ein Jahr (0,6; 0,9 bzw. 1,2 Jahre).

Bei den weiteren Überlegungen muss man beachten, dass in sehr vielen Betrieben die Datenbasis viel zu dünn ist, um hohe Genauigkeit fordern, realisieren oder gar kontrollieren zu können. Das heißt es hat wenig Sinn, an die Genauigkeit der Modelle Forderungen zu stellen, die zu komplexen Modellen und damit zu Forderungen nach Eingabedaten führen würden, die in der betrieblichen Realität nicht vorliegen.

Damit wäre die Orientierungsgröße bei der erreichbaren Genauigkeit die Qualität der vorliegenden Daten. Die Modelle müssen in der Lage sein, diese Daten komplett aufzunehmen und sinnvoll zu verarbeiten. Sobald dies möglich ist, ist ein detaillierteres Modell sinnlos.

Damit müssen die Modelle bzw. die einzelnen Module maximal folgende Forderungen erfüllen, damit durch die Modellbildung die maximal erreichbare Genauigkeit des Gesamtergebnisses nicht abnimmt:

- Daten entsprechend den Forderungen von Kapitel 3.1 (1-h-Mittelwerte aller relevanten Größen inkl. der zeitgleichen Erfassung der Produktionsdaten) müssen über ein Jahr als 1-h-Mittelwerte verarbeitbar sein
- Für genauere Betrachtungen schnell ablaufender Vorgänge müssen kürzere Zeiträume mit kürzeren Mittelwerten verarbeitbar sein
- Eine Korrelationsrechnung zwischen 2 und 3 Ein- oder Ausgangsgrößen muss bei der Modellbildung mit herangezogen werden können

Obige Forderungen sind mit Rechnerunterstützung problemlos einzuhalten, ohne dürfte der Bearbeiter aus zeitlichen Gründen bei komplexeren Betrieben nicht dazu in der Lage sein. Daraus folgt: Bei der Bearbeitung nach klassischem Muster wird der Bearbeiter zum Teil vereinfachen und damit einen größeren Fehler in Kauf nehmen als bei Bearbeitung mit Rechnerunterstützung, vorausgesetzt der Zeitaufwand ist in beiden Fällen der gleiche.

Zur Modellbildung werden üblicherweise die neuesten verfügbaren Daten herangezogen. Es empfiehlt sich das Ergebnis der Bemühungen mit älteren Datensätzen zu überprüfen. Hierzu wird zur weiteren Steigerung der Genauigkeit das mit oder ohne Rechnerunterstützung gewonnene Modell möglichst oft an Hand alter Datensätze getestet (Eingabe alter Produktionsdaten, Kontrolle des Ergebnisses mit den entsprechenden Energieverbrauchsdaten). Bei Abweichungen müssen das Modell, einzelne Module oder Korrelationen sowie die Datensätze überprüft und gegebenenfalls verbessert werden bzw. Fehler eliminiert werden. Auch hier kann mit Rechnerunterstützung bei gleichem Zeitbedarf eine größere Genauigkeit erreicht werden, soweit alte Datensätzen in ausreichender Menge vorliegen.

4 Betriebsanalysen und Ergebnisse

Mit diesem Kapitel sind die folgenden Intentionen verknüpft:

- Verdeutlichung und Untermauerung der bisherigen Überlegungen an Hand von Beispielen
- Nachweis der Funktion der entwickelten Module und Programme und Nachweis der Berechtigung des bisherigen Vorgehens
- Darstellung der bisher gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse

Für diese Arbeit wurden die folgenden vier Beispiele ausgewählt:

- ein Kalksandsteinwerk, als einfaches und somit als Ganzes in dieser Arbeit vorstellbares Beispiel
- ein Trockner zum Trocknen von Kräutern oder Semmelbröseln, als Beispiel einer Verfahrensoptimierung
- eine Großbäckerei, bei der ein Konzept mit hoher Kapitalrücklaufzeit umgesetzt wurde und alle damit verbundenen Probleme aufgezeigt werden konnten
- ein Werk zur Herstellung von Automobilen, um das Vorgehen in einem größeren und komplexeren Werk aufzuzeigen

Das Vorgehen bei der energetischen Optimierung des Kalksandsteinwerkes wird in wesentlichen Zügen ganz dargestellt (Kapitel 4.1). Aus den anderen hier vorgestellten, wesentlich komplexeren Untersuchungen (Kapitel 4.2 und 4.3) werden nur die wichtigsten Schritte und Ergebnisse vorgestellt, um den Umfang der Arbeit nicht zu sprengen.

4.1 Herstellung von Kalksandsteinen

Im Rahmen eines vom Umweltbundesamt geförderten Forschungsvorhabens wurde 1989 ein norddeutsches Kalksandsteinwerk analysiert. Mit diesem Vorhaben sollten allgemeine Aussagen zur damals geplanten Wärmenutzungsverordnung /12/ erarbeitet und ein Wärmenutzungskonzept für das Kalksandsteinwerk erstellt werden /13/. Der Kontakt mit dem Leiter des Kalksandsteinwerkes blieb bestehen, und es folgten im Rahmen einer Betriebserweiterung weitere Analysen und Konzepte /14/.

4.1.1 Betriebsablauf

Die zur Herstellung der Kalksandsteine notwendigen Komponenten Quarzsand, Kalk und Wasser werden in einem Mischer durchgemengt und in Reaktoren geleitet. In diesen erfolgt die exotherme Löschreaktion. Anschließend wird in vollautomatischen Pressen aus der warmen Rohmasse der Rohstein geformt, auf Loren gestapelt und mit diesen in die Härtekessel eingefahren.

Der Härteprozess erfolgt bei 16 bar Dampfdruck mindestens 4 Stunden in insgesamt 10 Härtekesseln. Nach dem Entladen der Härtekessel ist der Produktionsprozess abgeschlossen.

4.1.2 Beschreibung der energetisch relevanten Anlagen und Stoffströme

Dampferzeuger und Härtebetrieb

Beim Dampferzeuger handelt es sich um einen 10-Stufen-Gaskessel mit einer maximalen Dampferzeugung von 5 t/h. Er wird ausschließlich dazu verwendet, den Dampfbedarf der Härtekessel zu decken. Der Leistungsgang unterliegt, entsprechend dem nicht kontinuierlichen Betrieb der Härtekessel, starken Schwankungen.

Der Dampferzeuger wird mit einem Economiser betrieben und weist einen Jahresnutzungsgrad von 94,7 % auf. In den Rauchgasen sind bei Temperaturen von 100 bis 120 ° C noch 4% der eingesetzten Energie enthalten. Ohne Economiser hätte der Dampfkessel einen Wirkungsgrad von 89 % bei Abgastemperaturen von 270 ° C.

Der erzeugte Dampf wird den Härtekesseln zugeführt, um die Kalksandsteine unter Dampfdruck zu härten. Die Härtekessel müssen bis zum Ende des Härteprozesses auf Druck gehalten werden. Vor dem Öffnen der Härtekessel muss dieser Druck abgebaut werden. Hierzu werden noch nicht auf dem nötigen Druckniveau befindliche Härtekessel mit dem in abzulassenden Härtekesseln befindlichen Dampf gespeist. Dieses Überlassen ist nur bis zum Druckausgleich zwischen beiden Kesseln möglich. Anschließend muss der verbleibende Restdampf in einen Kessel mit geringerem Druckniveau abgegeben werden (mehrmaliges Überlassen), soweit ein solcher vorhanden ist. Der verbleibende Restdampf verlässt als Abdampf den Härtekessel. Die Abdampfmenge und damit der Energieverlust sind um so geringer, je mehr hochzufahrende Kessel zur Verfügung stehen. Im untersuchten Kalksandsteinwerk ist ein zwei- bis dreimaliges Überlassen üblich.

Die vorhandene Wärmerückgewinnungsanlage

Die Energie aus dem anfallenden Kondensat, dem Abdampf und den Rauchgasen des Dampfkessels wird zum Teil in einer Wärmerückgewinnungsanlage genutzt. In Bild 4.1-1 ist das Anlagenschema dargestellt.

Das in den 10 Härtekesseln anfallende Kondensat gelangt über die Kondensatsammelbehälter in einen Entspannungsbehälter. Der dort entstehende Entspannungsdampf wird in den Speisewasserbehälter eingedüst. Das im Entspannungsbehälter verbleibende Kondensat fließt in einen drucklosen Wasserbehälter, aus dem Energie zur Raumwärmebedarfsdeckung für das Verwaltungsgebäude entnommen wird. Der nach mehrmaligem Überlassen der Härtekessel noch verbleibende Abdampf wird ebenfalls in den Speisewasserbehälter eingedüst. Das so auf 80 bis 90 ° C vorgewärmte Kesselspeisewasser wird vor Eintritt in den Kessel durch die Rauchgase im Economiser, der als Gegenstrom-

wärmeübertrager ausgeführt ist, auf bis zu 150 ° C erwärmt. Der im Speisewasserbehälter nicht kondensierende Dampf wird in einen Wasserbehälter geführt und gelangt von dort zum Großteil in den Überlauf. Überschüssiges Wasser wird bei Bedarf als Anmachwasser bei der Kalksandsteinherstellung verwendet; der relativ geringe Rest gelangt ebenfalls in den Überlauf.

Die gesamte Anlage nutzt die an Kondensat und Abdampf gebundene Abwärme zu ca. 25 % (Speisewasservorwärmung und Raumheizung). Die restlichen 75 % werden, gebunden an Dampf oder Wasser, an die Umgebung abgegeben.

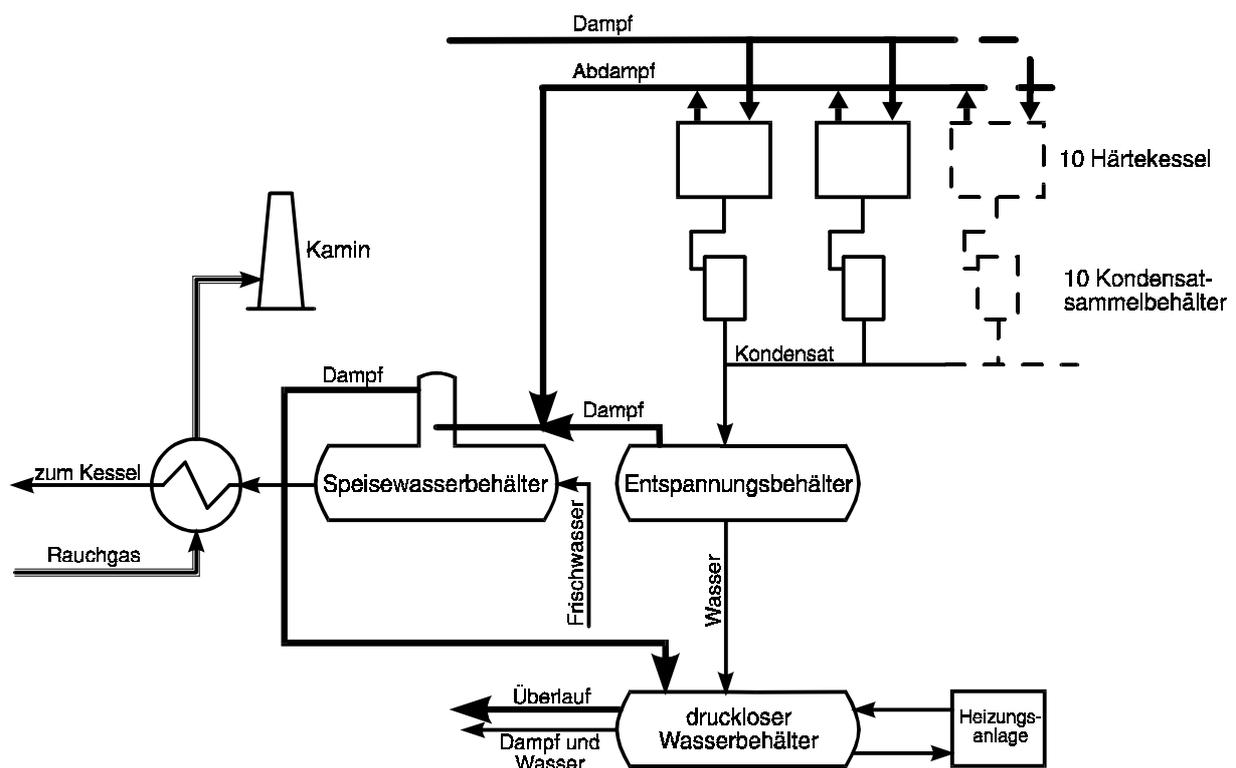


Bild 4.1-1: Anlagenschema der installierten Wärmerückgewinnung /13/

4.1.3 Ergebnisse des Wärmenutzungskonzeptes

Das Kalksandsteinwerk wurde während der Erstellung des Wärmenutzungskonzeptes mit etwas über einer Schicht gefahren (Betriebsstufe 1). Bedingt durch sehr günstige Prognosen bezüglich der zu erwartenden Absatzentwicklung, war bereits bei Erstellung des Konzeptes davon auszugehen, dass in Zukunft mit 1,5 bis 2 Schichten gefahren wird (Betriebsstufe 2). Die Basis für alle Überlegungen zum rationelleren Energieeinsatz war damit eine 1,5-fache Produktionsmenge. Die Auswirkungen dieser Produktionssteigerung auf den Energieeinsatz und auf die Abwärmeströme mussten auf Basis der vorliegenden Betriebsdaten und Messungen und der für die Zukunft geplanten Produktionsmenge abgeschätzt werden.

Insgesamt wurde lediglich eine geringfügige organisatorische Maßnahme identifiziert und mittlerweile vom Betrieb auch ergriffen: Ein Rauchgasschieber wird in Folge der Betriebsuntersuchung nun auch über Nacht und nicht nur über das Wochenende eingeschoben.

Dieses Ergebnis deckt sich mit den Ergebnissen einer weiteren Untersuchung, die von der Forschungsstelle für Energiewirtschaft im Auftrag des Bundesverbandes Kalksandstein durchgeführt wurde /15/. Bei dem im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Kalksandsteinwerk handelt es sich um das Werk mit dem niedrigsten spezifischen Energieverbrauch aller Kalksandsteinwerke in Deutschland.

4.1.4 Modularisierung des Kalksandsteinwerkes

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Betriebsablauf im Kalksandsteinwerk an Hand der damals ermittelten Daten und Fakten modularisiert. Bild 4.1-2 zeigt die modulare Darstellung des Betriebes, wobei nicht alle 10 Härtekessel abgebildet wurden. Die in Bild 4.1-2 dargestellte Modulfolge gibt die Realität exakt wieder.

Es lagen aus der Betriebsuntersuchung folgende Messdaten (¼-Stunden-Werte über zwei Wochen) vor:

- Gaseinsatz Dampferzeuger
- Bedarf an Kesselspeisewasser Dampferzeuger
- Temperaturverlauf Rauchgase vor und nach Economiser
- Temperaturverlauf Kesselspeisewasser vor und nach Economiser
- Temperaturverlauf Kesselspeisewasser vor Kesselspeisewasserbehälter
- Temperaturverlauf Abdampf
- Temperaturverlauf Kondensat vor und nach Entspannungsbehälter
- Temperaturverlauf Abdampf nach Entspannungsbehälter
- Stromeinsatz Werk gesamt
- Stromeinsatz Pressen

Es lagen außerdem die folgenden allgemeinen Informationen vor:

- monatlicher Verbrauch Gas und Strom
- monatlicher Verbrauch Kesselspeisewasser
- monatliche Produktionsdaten
- Produktionspausen
- Belegungsfolge der Härtekessel, abhängig vom Wochentag und der Belastung am Vortag (z. B. nach Feiertagen)
- Leistungsdaten aller Anlagenkomponenten
- grob abgeschätzte Anzahl der Duschvorgänge pro Arbeitstag (Duschen für die Arbeitnehmer)

Es wurden folgende Annahmen getroffen:

- Zur Abschätzung des Wärmebedarfs für die Beheizung des Verwaltungsgebäudes wurde eine für Norddeutschland typische Heizwärmebedarfskurve mit abgesenktem Wochenendbetrieb für ein freistehendes Einfamilienhaus gleicher Größe angenommen
- Temperatur und Wassermenge pro Duschvorgang

Die energetisch relevanten Daten obiger Messungen, Informationen und Abschätzungen wurden in die jeweiligen Module bzw. Dateien eingegeben. Da sich die Abläufe in den Härtekesseln in kürzeren Zeiträumen als Stunden wesentlich ändern, wurden die ersten Optimierungsschritte mit einer einminütigen Intervallzeit durchlaufen. Hierbei wurden realistische Stundenmittelwerte für alle Wochentage mit allen im praktischen Betrieb möglichen Belastungen erarbeitet.

Nach mehreren Optimierungsschritten konnte der berechnete Energieverbrauch über ein ganzes Jahr sehr gut mit dem tatsächlichen Jahresenergieverbrauch für die Betriebsstufe 1 (etwas über eine Schicht) in Deckung gebracht werden.

Auf dieser Datengrundlage wurden der zu erwartende Energieverbrauch und seine Verteilung über die 8760 Stunden eines Jahres für die Produktionsstufe 2 (1,5 bis 2 Schichten), über die Eingabe der neuen Produktionsdaten, abgeschätzt.

Diese vergleichsweise fundierte Datenbasis konnte bei der Beantwortung der folgenden Fragen herangezogen werden:

- Können über die bestehende Wärmerückgewinnung hinaus weitere Wärmesenken und -quellen verknüpft werden? (Ergebnisse siehe Kapitel 4.1.5.1)
- Ist es energetisch sinnvoll und wirtschaftlich rentabel, die alte Wärmerückgewinnung durch eine neue und energetisch optimierte Wärmerückgewinnung zu ersetzen? (Ergebnisse siehe Kapitel 4.1.5.2)
- Welchen Einfluss hat eine verlängerte Betriebspause (z. B. wegen lang anhaltendem Frostwetter) auf die Rentabilität einzelner Maßnahmen? (In dieser Arbeit nicht näher ausgeführt)

4 Jahre nach Abschluss der Arbeiten am Energiekonzept wurde von Seiten des Betreibers des Kalksandsteinwerkes eine erhebliche Produktionserweiterung (Betriebsstufe 3) mit folgenden Eckdaten geplant:

- 2,5-fache Produktion gegenüber Betriebsstufe 2
- Umstellung eines Teils der Produktpalette auf Planelemente, daher etwas andere Belegungsdichte der Härtekessel
- größere Härtekessel
- zusätzliche Härtekessel

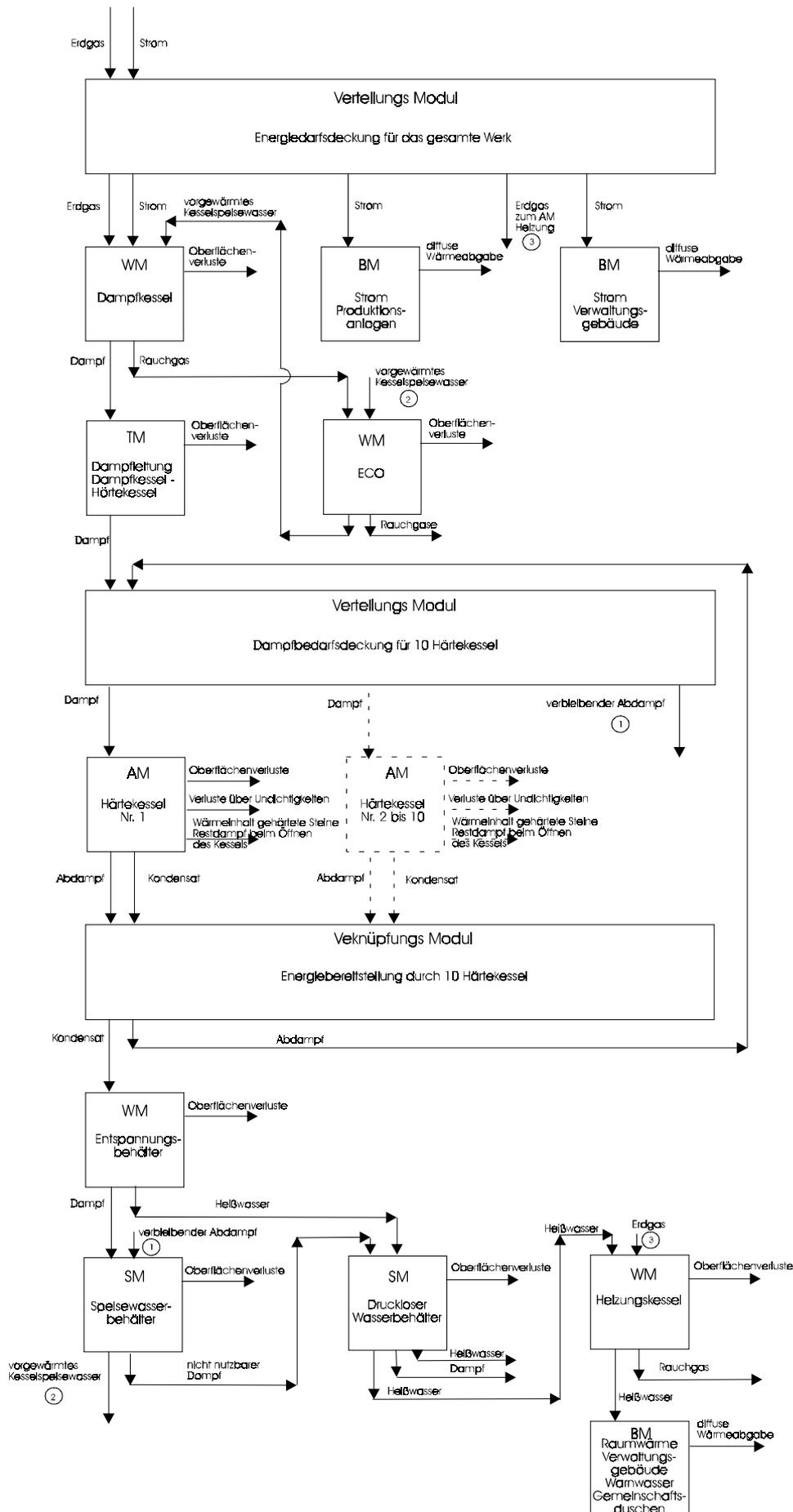


Bild 4.1-2: Modulschaltbild Kalksandsteinwerk

Die Modulfolge des Kalksandsteinwerkes wurde entsprechend modifiziert, um die folgenden Fragen beantworten zu können:

- zu erwartender Energieeinsatz und sein Jahresgang in 1-Stunden-Werten für Betriebsstufe 3
- zu installierende Leistung des neuen Dampferzeugers
- Entwicklung eines Wärmerückgewinnungskonzeptes und Ermittlung seiner Rentabilität (Ergebnisse siehe Kapitel 4.1.5.3)

Bei der Ermittlung der Leistungsgröße der verschiedenen Komponenten (Dampferzeuger, Wärmeübertrager) musste beachtet werden, dass eine Rückführung von Energie in den Prozess Einfluss auf die Leistungsgröße verschiedener Komponenten haben kann.

Folgendes Vorgehen wurde angewendet:

Zuerst wurde nur der Rumpfprozess (Härtekessel inklusive Überlassen und Dampferzeuger) ohne jegliche Wärmerückgewinnung betrachtet, und mithilfe des Modulrechenprogramms wurden der daraus folgende Energieeinsatz und die daraus folgenden - sehr hohen - Abwärmeströme ermittelt.

Für die Abwärmesenken und -quellen wurde mithilfe des Verknüpfungsprogrammes, unter bestimmten wirtschaftlichen Vorgaben, ein Wärmerückgewinnungskonzept erstellt.

Die daraus folgende Wärmerückgewinnung und Rückführung der Energie in den Prozess reduziert den ohne Wärmerückgewinnung berechneten Energieeinsatz, die Größe verschiedener Komponenten (wie z. B. den Dampferzeuger) und damit aber auch den Energieinhalt und u. U. die Temperatur der Abwärmeströme. Mit den neuen Informationen geht man wiederum in das Modulprogramm. Die daraus folgenden neuen Daten bezüglich der Abwärmeströme werden wiederum in das Verknüpfungsprogramm eingegeben.

Diese Optimierungsschleife muss solange durchlaufen werden, bis sich keine signifikante Änderung des Ergebnisses mehr ergibt.

Die hierbei ermittelte Dampferzeugerleistung lag bei 9,5 kW statt einer Leistung von 12,5 kW, die sich bei einer einfachen Hochrechnung der Leistung des alten Dampferzeugers mit der Produktionssteigerung ergeben hätte. Die dann tatsächlich umgesetzte Wärmerückgewinnung ist in Bild 4.1-4 dargestellt (Kapitel 4.1.6, Erläuterungen siehe dort).

4.1.5 Anwendung des Quellen-Senken-Verknüpfungsprogramms auf das Kalksandsteinwerk

In Kalksandsteinwerken wird üblicherweise mithilfe der Rauchgase oder der Kondensate aus den Härtekesseln das Kesselspeisewasser vorgewärmt. Die jeweils andere Wärmequelle wird meist nicht genutzt.

Als weitere Wärmequelle steht bei Kalksandsteinwerken der sehr unregelmäßig anfallende Abdampf aus den Härtekesseln zur Verfügung; eine Nutzung erfolgt meist nicht.

Eine Erwärmung des Kesselspeisewassers durch Rauchgas, Kondensat und Abdampf, wie in dem hier untersuchten Werk durchgeführt, ist die Ausnahme. Aber auch dann verbleiben hohe ungenutzte Anteile bei den Wärmequellen.

Allgemein erkannte Wärmesenken sind das Kesselspeisewasser und der Bedarf an Raumwärme und Warmwasser für die Duschen.

Unabhängig von der Kombination der 3 Wärmequellen mit den 2 Wärmesenken verbleiben ungenutzte Abwärmeströme in erheblichem Umfang (selbst beim untersuchten Werk werden nur 22,5 % der in Rauchgas, Kondensat und Abdampf enthaltenen Energie rückgewonnen). Dies ändert sich, wenn die Verbrennungsluft als weitere potenzielle Wärmesenke hinzugenommen wird. An Hand der Gleichzeitigkeit, der Absolutbeträge und der Medien der jeweiligen Energieströme der Quellen und Senken kann auf folgende Kombinationen geschlossen werden:

Rauchgase:

- Verbrennungsluftvorwärmung

Kondensat und Abdampf :

- erst Kesselspeisewasservorwärmung
- mit der Restwärme Raumwärme- und Warmwasserbedarfsdeckung

4.1.5.1 Betriebsstufe 2 bei vorhandener Wärmerückgewinnung

Für das bestehende Werk wird geprüft, ob, parallel zur vorhandenen Wärmerückgewinnung, für die Betriebsstufe 2 weitere Wärmeströme genutzt werden können. Nach der Nutzung durch die bereits bestehende Wärmerückgewinnung stehen noch die folgenden Wärmequellen und Wärmesenken zur Verfügung:

Wärmequellen:

1. Rauchgas mit	120 ° C	Wärmemenge pro Jahr:	338.465 kWh
2. Kondensat mit	150 ° C	Wärmemenge pro Jahr:	1.557.906 kWh
3. Abdampf mit	120 ° C	Wärmemenge pro Jahr:	1.433.864 kWh

Wärmesenken:

- | | |
|--|-------------|
| 1. Restbedarf Heizung und Warmwasser,
Wärmebedarf pro Jahr: | 109.400 kWh |
| 1. Verbrennungsluftvorwärmung, Wärmebedarf pro Jahr:
(bei einer Erwärmung der Verbrennungsluft auf das Temperaturniveau der heißesten Quelle) | 493.209 kWh |
| 2. Weitere Vorerwärmung des Kesselspeisewassers um 20 K,
Wärmebedarf pro Jahr: | 227.907 kWh |

Um die obere Grenze der möglichen Energierückgewinnung abzustecken, werden in einem ersten Schritt alle Maßnahmen mit einer Kapitalrückflusszeit von 10 Jahren betrachtet. Die nachfolgende Übersicht zeigt die Kapitalrückflusszeiten der Kombinationen:

Quellen/Senken-Kombination	Pro Jahr rückgewinnbare Energie in kWh bei 10 Jahren Kapitalrückflusszeit
Rauchgas/Heizung-Warmwasser	0
Rauchgas/Verbrennungsluft	0
Rauchgas/Kesselspeisewasser	0
Kondensat/Heizung-Warmwasser	96.877
Kondensat/Verbrennungsluft	0
Kondensat/Kesselspeisewasser	227.892
Abdampf/Heizung-Warmwasser	85.180
Abdampf/Verbrennungsluft	0
Abdampf/Kesselspeisewasser	0

Aus den verschiedenen Quellen/Senken-Kombinationen ergibt sich die folgende günstigste Gesamtlösung:

Kondensat/Kesselspeisewasser: 227.892 kWh/a
 Abdampf/Heizung-Warmwasser: 85.180 kWh/a
 Summe: 313.072 kWh/a

Bei der Kombination Kondensat/Kesselspeisewasser wird die Temperatur des Kesselspeisewasser zusätzlich zur bestehenden Vorwärmung um 20 K erhöht. Eine weitere Erhöhung ist bei bestehendem ECO und bestehender Kesselspeisewasserpumpe aus Materialgründen nicht möglich. Außerdem würde bei einer weiteren Temperaturerhöhung die Wärmeübertragung im ECO zurückgehen.

Der zusätzliche Wärmeübertrager ist sekundärseitig zwischen der Kesselspeisewasserpumpe und dem ECO eingebunden, primärseitig zwischen Kondensatsammelbehälter und Entspannungsbehälter.

Bei der Kombination Abdampf/Heizung-Dusche wird durch eine Verbesserung der Wärmedämmung des drucklosen Wasserbehälters und durch einen zusätzlichen Wärmespeicher der Wärmeeintrag in das Heizungs- und Warmwassernetz während Zeiten mit geringem oder keinem Abwärmeeinfall verbessert.

Mit der vorhandenen Wärmerückgewinnung werden 964.136 kWh rückgewonnen bzw. 22,5 % der insgesamt zur Verfügung stehenden, auf Umgebungstemperatur bezogenen Abwärme. Mit einer Erweiterung der Wärmerückgewinnung bei 10 Jahren Kapitalrückflusszeit können weitere 7 % rückgewonnen werden.

Der Betreiber des Kalksandsteinwerkes ist bereit eine Kapitalrückflusszeit von 3 Jahren zu akzeptieren. Hierdurch reduzieren sich die Möglichkeiten einer Wärmerückgewinnung auf die folgende Kombination:

Kondensat/Kesselspeisewasser 182.427 kWh/a

Dies sind 4 % der insgesamt zur Verfügung stehenden Abwärme.

Dieses Ergebnis mit relativ geringen zusätzlichen Wärmerückgewinnungspotenzialen war bei einem Werk mit bestehender Wärmerückgewinnung zu erwarten. Im nächsten Kapi-

tel wird überprüft, inwieweit durch einen Ersatz der gesamten Wärmerückgewinnung durch eine verbesserte Konzeption die Wärmerückgewinnungsgrade verbessert werden könnten.

4.1.5.2 Betriebsstufe 2 ohne vorhandene Wärmerückgewinnung

Zur Überprüfung der Gesamtkonzeption – vorhandene Wärmerückgewinnung/zusätzliche Maßnahmen – wurden die Quellen/Senken-Kombinationen für das Werk ohne jegliche bestehende Wärmerückgewinnung für die Betriebsstufe 2 berechnet. Es stehen dann die folgenden Wärmequellen und Wärmesenken zur Verfügung:

Wärmequellen:

1. Rauchgas mit	270 ° C	Wärmemenge pro Jahr:	820.779 kWh
2. Kondensat mit	190 ° C	Wärmemenge pro Jahr:	2.112.026 kWh
3. Abdampf mit	120 ° C	Wärmemenge pro Jahr:	1.993.563 kWh

Wärmesenken:

1. Gesamtbedarf Heizung und Warmwasser, Wärmebedarf pro Jahr:	218.800 kWh
2. Verbrennungsluftvorwärmung, Wärmebedarf pro Jahr: (bei einer Erwärmung der Verbrennungsluft auf das Temperaturniveau der heißesten Quelle)	867.002 kWh
3. Vorerwärmung des Kesselspeisewassers auf 200 ° C, Wärmebedarf pro Jahr:	2.279.262 kWh

Um die obere Grenze der möglichen Energierückgewinnung abzustecken, werden in einem ersten Schritt alle Maßnahmen mit einer Kapitalrückflusszeit von 10 Jahren betrachtet. Die nachfolgende Übersicht zeigt die Kapitalrückflusszeiten der Kombinationen:

Quellen/Senken-Kombination	Pro Jahr rückgewinnbare Energie in kWh bei 10 Jahren Kapitalrückflusszeit
Rauchgas/Heizung und Warmwasser	187.589
Rauchgas/Verbrennungsluft	674.655
Rauchgas/Kesselspeisewasser	820.429
Kondensat und Abdampf primär/Heizung und Warmwasser	193.682
Kondensat und Abdampf primär/Verbrennungsluft	0
Kondensat und Abdampf primär/Kesselspeisewasser	1.873.083
Kondensat und Abdampf sekundär/Heizung und Warmwasser	181.758
Kondensat und Abdampf sekundär/Verbrennungsluft	0
Kondensat und Abdampf sekundär/Kesselspeisewasser	1.178.936

Aus den verschiedenen Quellen/Senken-Kombinationen ergibt sich die folgende günstigste Gesamtlösung:

Rauchgas/Verbrennungsluft	674.655 kWh/a
Kondensat und Abdampf primär/Kesselspeisewasser	1.873.083 kWh/a
Kondensat und Abdampf sekundär/Heizung und Dusche	181.758 kWh/a
Summe	2.729.496 kWh/a

Dies entspricht 63,6 % der insgesamt zur Verfügung stehenden, auf Umgebungstemperatur bezogenen Abwärme (zum Vergleich: bestehende Wärmerückgewinnungsanlage 22,5 % plus Erweiterung mit maximal 7%).

Bei einer Kapitalrückflusszeit von 3 Jahren reduzieren sich die Möglichkeiten einer Wärmerückgewinnung auf die folgenden Kombinationen:

Kondensat und Abdampf primär/Kesselspeisewasser	1.565.114 kWh/a
Kondensat und Abdampf sekundär/Heizung und Dusche	118.588 kWh/a
Summe	1.683.702 kWh/a

Dies sind 39,2 % der insgesamt zur Verfügung stehenden Abwärme.

Da jedoch bereits eine funktionstüchtige Wärmerückgewinnung vorhanden ist, muss bei der Ermittlung der Kapitalrückflusszeit berücksichtigt werden, dass derzeit mit einer bereits abgeschriebenen Anlage pro Jahr 964.136 kWh rückgewonnen werden. Es existieren keine Maßnahmen oder Maßnahmenbündel mit einer Kapitalrückflusszeit von unter 3 Jahren, wenn als Einsparung nur die Differenz zwischen der tatsächlichen Einsparung und der derzeitigen Einsparung angesetzt werden kann.

Es ist unter der Vorgabe von 3 Jahren Kapitalrückflusszeit nicht sinnvoll, die bestehende Wärmerückgewinnung durch eine neue Wärmerückgewinnung zu ersetzen.

4.1.5.3 Optimierung der Wärmerückgewinnung für Betriebsstufe 3

Wie in Kapitel 4.1.4 bereits beschrieben, ist für die Betriebsstufe 3 ein weitgehender Neubau des Werkes notwendig. Daraus folgt, dass mehrere Optimierungsläufe mit dem Modulprogramm und dem Verknüpfungsprogramm durchgeführt werden müssen, um die Größe der einzelnen Komponenten festzulegen. Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf das optimierte Gesamtergebnis und nicht auf einzelne Zwischenschritte.

Die Art der gewählten Wärmerückgewinnung und die Größe der einzelnen Komponenten hängen maßgeblich von der vorgegebenen Kapitalrückflusszeit ab. Bei den Berechnungen für Bild 4.1-3 wurden dem Quellen-Senken-Verknüpfungsprogramm Kapitalrückflusszeiten von 1 bis 15 Jahren vorgegeben. Das Bild zeigt die jährlich einsparbare Energie über der akzeptierten Kapitalrückflusszeit für die Summe der Einzelmaßnahmen.

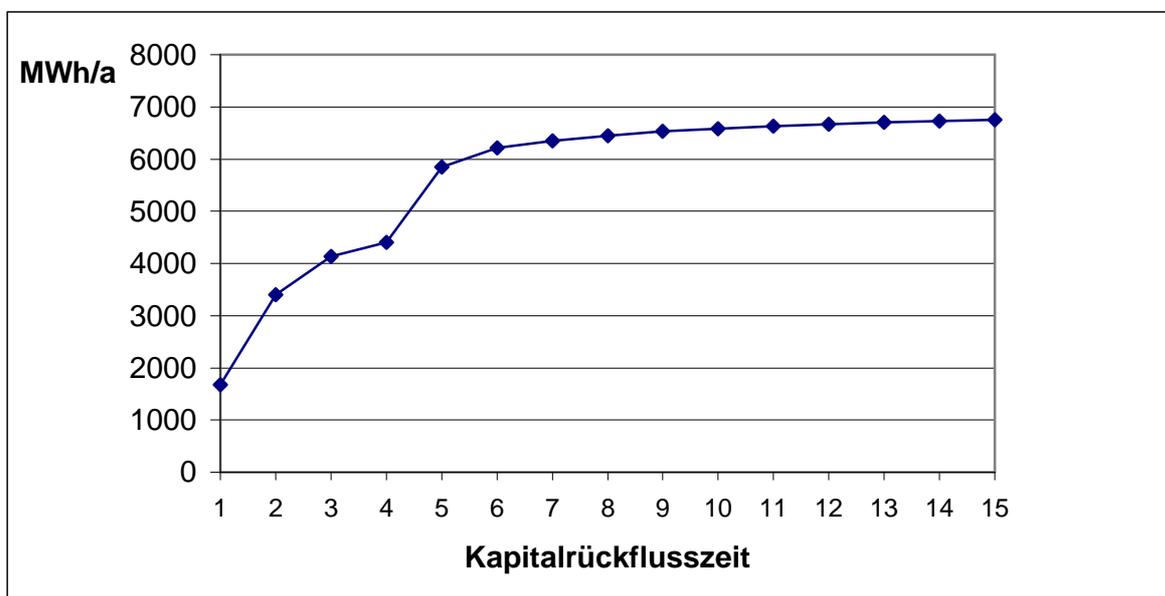


Bild 4.1-3: Jährlich einsparbare Energie über der akzeptierten Kapitalrückflusszeit für die Summe der Einzelmaßnahmen im untersuchten Kalksandsteinwerk für Betriebsstufe 3

Die Kurve steigt für Kapitalrückflusszeiten bis 3 Jahre steil an, flacht dann etwas ab, macht einen ausgeprägten Sprung nach oben und geht dann in die Sättigung über. Dieser etwas unregelmäßige Verlauf kommt aus folgendem Grund zu Stande:

Im Bereich von 1 bis 4 Jahre ist eine Verbrennungsluftvorwärmung nicht rentabel; es ergeben sich die folgenden zwei Maßnahmen:

- Wärmeübertragung vom warmen Kondensat und Abdampf auf das kalte Kesselspeisewasser
- Anschließend Raumwärmebedarfsdeckung und Warmwasserbereitung durch die Restwärme aus Kondensat und Abdampf

Ab knapp unter 5 Jahren Kapitalrückflusszeit kommt die Verbrennungsluftvorwärmung mittels der Rauchgase hinzu, daher in Bild 4.1-3 der deutliche Sprung nach oben.

Für den Betreiber stellte sich die Alternative, Kapitalrückflusszeiten um die 3 Jahre oder um die 5 Jahre zu akzeptieren.

In Anbetracht der Tatsache, dass die derzeit bestehende Wärmerückgewinnung mehr als 20 Jahre in Betrieb war, wurde in Tabelle 4.1-1 der Unterschied zwischen 3 und 5 Jahren nach der Kapitalwertmethode in Abhängigkeit von der tatsächlichen Nutzungsdauer der Wärmerückgewinnung dargestellt. Der Kapitalwert ist auf den Beginn der Maßnahmen abgezinst, bei einer Kapitalverzinsung von 7% und unter Berücksichtigung der Kosten für Wartung und Instandhaltung.

Kapitalwert zu Beginn der Maßnahme in TDM bei 7 % Zins		
Tatsächliche Nutzungsdauer in Jahren	3 Jahre akzeptierte Kapitalrückflusszeit (2 Maßnahmen)	5 Jahre akzeptierte Kapitalrückflusszeit (3 Maßnahmen)
1	- 204	-427
2	- 84	-258
3	29	-101
4	134	46
5	232	183
6	325	311
7	411	431
8	491	543
9	566	648
10	636	746
15	924	1147
20	1129	1434

Tabelle 4.1-1: Kapitalwert der Wärmerückgewinnungsvarianten in Abhängigkeit von der tatsächlichen Nutzungsdauer

Wird die Wärmerückgewinnung wie im alten Werk 20 Jahre betrieben, erwirtschaftet die Variante mit 5 Jahren Kapitalrückflusszeit ein um 305 TDM bzw. 27 % besseres Ergebnis. Bereits nach 7 Jahren weist die Variante mit 5 Jahren Kapitalrückflusszeit einen höheren Kapitalwert auf als die Konkurrenzvariante mit 3 Jahren Kapitalrückflusszeit, d. h., ab dem 7. Betriebsjahr hat sich das wirtschaftliche Risiko der höheren Investition, bei der Variante mit 5 Jahren Kapitalrückflusszeit, gelohnt.

4.1.6 Fazit Kalksandsteinwerk

Für das untersuchte Kalksandsteinwerk ist, bei der geplanten zukünftigen Produktion (Betriebsstufe 2) und nach der bestehenden Wärmerückgewinnung, mit einem an die Abwärmeströme Rauchgas, Abdampf und Kondensat gebundenen Abwärmeeinfall von 3.330.235 kWh/a (=100%) zu rechnen.

Die vorhandene Wärmerückgewinnung kann nur geringfügig verbessert werden:

Bei 10 Jahren Kapitalrückflusszeit verbleibt ein Abwärmeeinfall

von: 3.017.163 kWh/a (=90,6%)

Bei 3 Jahren Kapitalrückflusszeit verbleibt ein Abwärmeeinfall

von: 3.147.808 kWh/a (=94,5%)

Würde man die bestehende Wärmerückgewinnung komplett erneuern (bzw. würde ein weitgehend baugleiches Kalksandsteinwerk ohne Wärmerückgewinnung betrachtet), könnte der Abwärmeeinfall wie folgt reduziert werden:

Bei 10 Jahren Kapitalrückflusszeit verbleibt ein Abwärmeeinfall

von: 2.196.872 kWh/a (=66,0%)

Bei 3 Jahren Kapitalrückflusszeit verbleibt ein Abwärmeeinfall

von: 3.242.666 kWh/a (=97,4%)

Für die geplante Betriebserweiterung (Betriebsstufe 3, mit einer gegenüber Betriebsstufe 2 um den Faktor 2,5 erhöhten Produktion) wurde vom Betriebsleiter eine Wärmerückgewinnung mit 5 Jahren Kapitalrückflusszeit akzeptiert. Bild 4.1-4 zeigt das entsprechende Modulschaltbild für den gesamten Betrieb.

Die Unterschiede zur derzeitigen Wärmerückgewinnung ergeben sich wie folgt:

- Der Dampfkessel wird mit vorgewärmtem Kesselspeisewasser und vorgewärmter Verbrennungsluft betrieben
- Es stehen insgesamt 15 statt 10 Härtekessel zur Verfügung. Daher konnte der Überlassvorgang noch etwas optimiert werden
- Der Abdampf und der Entspannungsdampf aus dem Kondensat werden entsprechend ihrem Druckniveau „sortiert“ und an der energetisch günstigsten Stelle in die Wärmerückgewinnung eingespeist
- Das Kesselspeisewasser wird wie folgt mehrstufig vorgewärmt (von kalt nach warm):
 - über einen Wärmeübertrager mit dem abfließenden Warmwasser aus dem Kondensationsbehälter
 - durch Abdampf- und Entspannungsdampfeinspeisung in den Vorwärmbehälter
 - durch Abdampf- und Entspannungsdampfeinspeisung in den Speisewasserbehälter

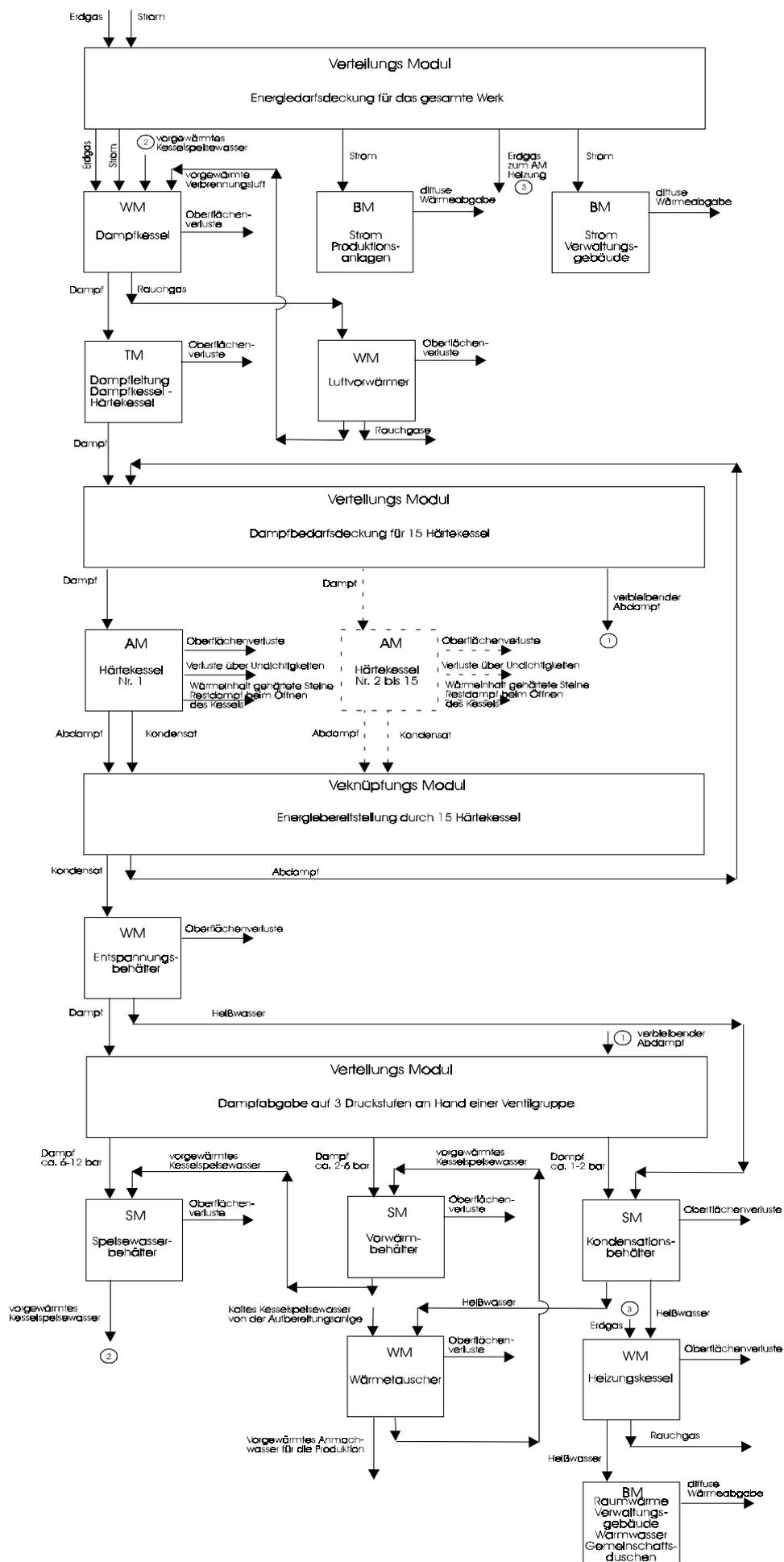


Bild 4.1-4: Modulschaltbild neues Kalksandsteinwerk für Betriebsstufe 3

4.2 Wärmerückgewinnung aus der Kondensationswärme

4.2.1 Vorüberlegungen

Neben der Energieverbrauchsoptimierung ganzer Betriebe eignet sich das Programmpaket auch zur genaueren Betrachtung einzelner Prozesse. Als Beispiel wird im Folgenden der gesamte Komplex: „Trockner (oder Backofen) mit anschließender Wärmerückgewinnung aus Rauchgas und Abluft (beim Backofen Rauchgas und Schwaden) bis zur Kondensation der Feuchteanteile“ näher betrachtet.

Hierzu einige theoretische Vorüberlegungen: In Bild 4.2-1 ist die pro Kelvin Abkühlung der Rauchgase aus einer 1 MW Erdgasfeuerung rückgewinnbare Leistung eingezeichnet, bei einer maximalen Rauchgastemperatur von 300 ° C und einer Abkühlung der Rauchgase auf minimal 0 ° C. Deutlich ist die bei ca. 55 ° C beginnende Kondensation der Feuchte aus den Rauchgasen und der dadurch bedingte Leistungsanstieg zu erkennen. Zusätzlich ist in Bild 4.2-1 die zur Erwärmung der Verbrennungsluft notwendige Leistung, pro Kelvin Temperaturerhöhung, eingezeichnet. Durch den geringeren Massenkapazitätsstrom der Verbrennungsluft gegenüber den Rauchgasen liegt die notwendige Leistungsaufnahme etwas unter der möglichen Leistungsabgabe.

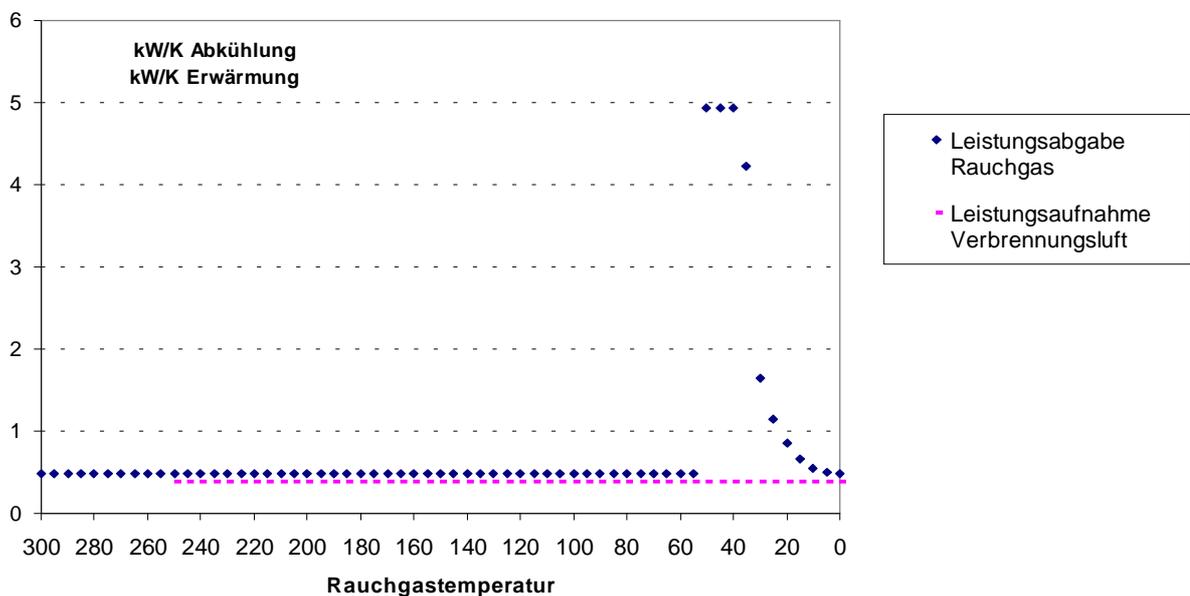


Bild 4.2-1: Pro Kelvin Temperaturabsenkung rückgewinnbare Leistung aus einer 1 MW Gasfeuerung und pro Kelvin Temperaturerhöhung notwendige Leistung bei einer Verbrennungsluftvorwärmung für eine 1 MW Feuerung

Die Differenz genügt in jedem Fall, um die Oberflächenverluste des Wärmeübertragers abzudecken. Außerdem ist die Grädigkeit des Wärmeübertragers, hier mit allgemein üblichen 50 K angenommen, zu berücksichtigen.

Beim Beispiel nach Bild 4.2-1 ergibt sich die folgende Energiebilanz für eine Stunde Voll-
lastbetrieb:

Gesamtenergieinhalt Rauchgas	244,0 kWh	100,0 %
Auf die Verbrennungsluft übertragbare Energie	107,1 kWh	43,9 %
Verluste Wärmeübertrager	15,0 kWh	6,1 %
Wegen der Grädigkeit des Wärmeübertragers nicht genutzter Anteil	23,9 kWh	9,8 %
Energieinhalt Feuchte (nicht genutzt)	98,0 kWh	40,2 %

Beim gewählten Beispiel kann auf die Verbrennungsluft 43,9 % der im Rauchgas enthaltenen Energie übertragen werden. Durch die Wahl eines größeren Wärmeübertragers mit geringerer Grädigkeit ist der rückgewinnbare Anteil noch auf maximal 50 % steigerbar, wenn auf Aspekte der Wirtschaftlichkeit keine Rücksicht genommen wird.

Für eine nennenswerte Steigerung des Wärmerückgewinnungsgrades bleibt nur der Energieinhalt, der bei der Kondensation der Feuchte anfallen würde, für dessen Ausnutzung eine zweite Wärmesenke notwendig ist, eine weitere Energieübertragung auf die Verbrennungsluft ist nicht möglich.

Ausnahmen, bei denen eine Wärmesenke genügt, stellen nur Wärmesenken mit extremem Niedertemperaturwärmebedarf dar, z. B: Erwärmung von Luft oder Wasser von 10 auf 40 ° C. Selbst Niedertemperaturheizungen mit einer Rücklauftemperatur von 30 bis 40 ° C erlauben nur Teilkondensation. Eine weitgehend vollständige Kondensation der Feuchte aus dem Rauchgas wird auch bei Niedertemperaturheizungen nur erreicht, wenn zusätzlich eine Verbrennungsluftvorwärmung erfolgt.

Die bisherigen Überlegungen gelten ebenso für die Erwärmung der Frischluft für einen Trockner durch die feuchte Abluft. Der Taupunkt bei der Abluft von Trocknern kann jedoch in wesentlich weiteren Grenzen schwanken als bei den Rauchgasen einer Erdgasfeuerung.

4.2.2 Trockneroptimierung

Aufbauend auf den Vorüberlegungen entsprechend Kapitel 4.2.1, wird im Folgenden ein Trockner, wie er in der Lebensmittelindustrie verwendet wird (z. B. Kräutertrocknung, Brot- oder Semmelbrösel Trocknung), näher betrachtet.

Das Modulschaltbild des untersuchten Trockners zeigt Bild 4.2-2. Die Feuerungs-wärmeleistung lag bei knapp über einem MW.

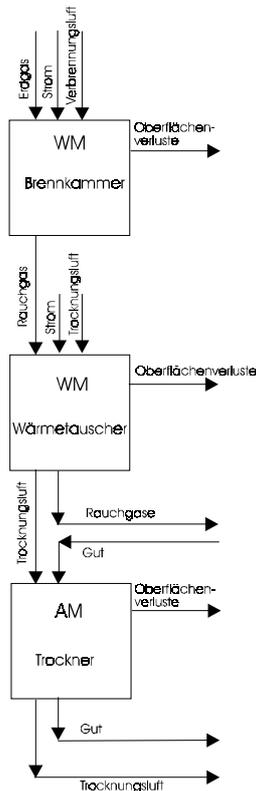


Bild 4.2-2: Modulschaltbild Trockner

Das zu trocknende Gut durchläuft einen Tunnel, durch den in Gegenrichtung heiße Luft eingeblasen wird. Diese wird in einem Wärmeübertrager durch die Rauchgase einer Erdgasfeuerung erwärmt.

Das Quellen-Senken-Verknüpfungsprogramm liefert die folgenden Verknüpfungen:

- Wärmeübertragung von der Trockner-Abluft auf die Trockner-Zuluft
- Wärmeübertragung von den Rauchgasen auf die Verbrennungsluft
- Wärmeübertragung vom trockenen Gut auf das feuchte Gut (mit Luft als Zwischenkreislaufmedium)

Die Wärmeübertragung von Gut auf Gut ist aufwändig und nur sehr selten wirtschaftlich (wenn, dann nur bei hohen Gutstemperaturen). Daher wird sie im Folgenden nicht weiter beachtet.

Für eine Wärmerückgewinnung mit Ausnutzung der Kondensationswärme sind, wie in Kapitel 4.2.1 bereits ausgeführt, zusätzliche Wärmesenken notwendig.

Den weiteren Überlegungen wurden die folgenden vier Varianten zu Grunde gelegt:

1. Betrieb ohne weitere Abwärmesenken
2. Betrieb mit erheblichem Bedarf an Warmwasser (z. B: zu Reinigungszwecken, Erwärmung von 10 auf 40 ° C)
3. Betrieb mit erheblichem Bedarf an Warmluft (z. B: Vortrocknung, Frischluft Spritzkabinen, Erwärmung von 15 auf 35 ° C)
4. Betrieb mit Warmwasserbedarf und Bedarf an Warmluft zur Raumwärmebedarfsdeckung (stark außentemperaturabhängig)

Tabelle 4.2-1 zeigt für verschiedene Kapitalrückflusszeiten die pro Jahr rückgewinnbare Energie und die hierbei zur Verfügung stehenden Ströme an Warmwasser und warmer Luft.

Je nach Amortisationsforderungen sowie Warmwasser- und -luftbedarf des Betriebes ergeben sich entsprechend Tabelle 4.2-1 sehr unterschiedliche Wärmerückgewinnungsmöglichkeiten: Bei einem Jahr Kapitalrückflusszeit ist keine der Maßnahmen wirtschaftlich, mit 2 Jahren ist die Trockenluftvorwärmung und mit 3 Jahren die Verbrennungsluftvorwärmung realisierbar. Werden 5 Jahre Kapitalrückflusszeit akzeptiert und besteht ein entsprechender Bedarf, kann die Warmwasserbereitung mittels Abwärme umgesetzt werden. Eine Lufterwärmung mittels der Abwärme ist erst ab 7,5 Jahren Kapitalrückflusszeit wirtschaftlich bzw. ab 10 Jahren, wenn kein ganzjähriger Warmluftbedarf besteht.

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
10 Jahre Kapitalrückflusszeit:				
Pro Jahr rückgewinnbare Energie in MWh/a	2.665	3.829	3.568	3.662
in Prozent vom gesamten Energieeinsatz des Trockners	55,3	79,5	74,1	76,0
Wasser mit 40 ° C in Nm3/a		33.579		20.113
in Nm3/Betriebsstunde Trockner		9,76		5,85
Luft mit 35 ° C in MillionenNm3/a			133	44
in Nm3/Betriebsstunde Trockner			38.601	12.825
7,5 Jahre Kapitalrückflusszeit:				
Pro Jahr rückgewinnbare Energie in MWh/a	2.579	3.509	2.875	3.105
in Prozent vom gesamten Energieeinsatz des Trockners	53,5	72,9	59,7	64,5
Wasser mit 40 ° C in Nm3/a		26.828		15.171
in Nm3/Betriebsstunde Trockner		7,80		4,41
Luft mit 35 ° C in MillionenNm3/a			44	0
in Nm3/Betriebsstunde Trockner			12.681	0
5 Jahre Kapitalrückflusszeit:				
Pro Jahr rückgewinnbare Energie in MWh/a	2.398	2.604	2.398	2.604
in Prozent vom gesamten Energieeinsatz des Trockners	49,8	54,1	49,8	54,1
Wasser mit 40 ° C in Nm3/a		5.939		5.939
in Nm3/Betriebsstunde Trockner		1,73		1,73
Luft mit 35 ° C in MillionenNm3/a			0	0
in Nm3/Betriebsstunde Trockner			0	0
3 Jahre Kapitalrückflusszeit:				
Pro Jahr rückgewinnbare Energie in MWh/a	1.885	1.885	1.885	1.885
in Prozent vom gesamten Energieeinsatz des Trockners	39,2	39,2	39,2	39,2
Wasser mit 40 ° C in Nm3/a		0		0
in Nm3/Betriebsstunde Trockner		0		0
Luft mit 35 ° C in MillionenNm3/a			0	0
in Nm3/Betriebsstunde Trockner			0	0
2 Jahre Kapitalrückflusszeit:				
Pro Jahr rückgewinnbare Energie in MWh/a	878	878	878	878
in Prozent vom gesamten Energieeinsatz des Trockners	18,2	18,2	18,2	18,2
Wasser mit 40 ° C in Nm3/a		0		0
in Nm3/Betriebsstunde Trockner		0		0
Luft mit 35 ° C in MillionenNm3/a			0	0
in Nm3/Betriebsstunde Trockner			0	0

Tabelle 4.2-1: Pro Jahr rückgewinnbare Energie für den untersuchten Trockner

4.2.3 Backföfenoptimierung

4.2.3.1 Darstellung der gewählten Wärmerückgewinnung

Bei folgendem Beispiel sind die Arbeiten von der Projektierung bis zur Realisierung bereits abgeschlossen. Im Rahmen eines von der DBU geförderten Vorhabens sollte an einem Backföfen eine sehr umfangreiche Wärmerückgewinnung mit Verbrennungsluftvorwärmung und Wärmerückgewinnung aus der Kondensationswärme realisiert werden /16/. Bei diesem Projekt wurden sehr hohe Kapitalrückflusszeiten akzeptiert. Außerdem kann an diesem Beispiel gezeigt werden, wie schnell in der Praxis die Planungsdaten von der Realität abweichen können.

Der Backföfen wird über eine Wärmeträgeranlage mit Energie versorgt. Die Feuerungs-wärmeleistung des Thermoölerhitzers liegt bei maximal 1.080 kW, bei einer maximalen Rauchgastemperatur von 340 °C.

Entsprechend Bild 4.2-3 (Modulschaltbild) und Bild 4.2-4 (Anlagenschema) wird mithilfe der Rauchgase die Verbrennungsluft in einem Luftvorwärmer (LuVo) auf maximal 250 °C erwärmt. Anschließend wird die Restwärme der Rauchgase zur Warmwasserbereitung genutzt. Das Warmwasser wird dann im Schwadenkondensator nacherwärmt. Je nach aktuellem Warmwasserbedarf und dem Füllstand der Speicher erfolgt eine Erwärmung auf bis zu 95 °C. Da die Taupunkttemperatur der Schwaden bei 100 °C liegt, kann der Schwadenkondensator dem Rauchgaswärmeübertrager nachgeschaltet werden, ohne auf eine Teilkondensation der Feuchteanteile zu verzichten. Bei den Schwaden handelt es sich um die Abluft aus dem Backföfen, ein Gemisch aus Wasserdampf und gesättigter Luft.

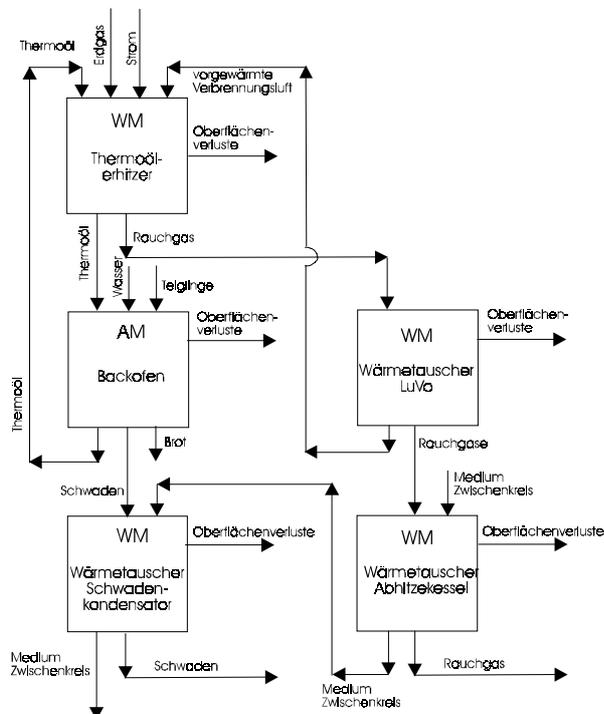


Bild 4.2-3: Modulschaltbild der Anlage nach Bild 4.2-4

Die an die Verbrennungsluft abgegebene Energie wird wieder in den Prozess zurückgeführt. Da dies nicht mit der gesamten Abwärme möglich ist, kann die verbleibende Abwärme nur dem bestehenden Warmwasser- und Heizungssystem zugeführt werden.

Die untersuchte Großbäckerei belässt die von ihr produzierten Lebensmittel so natürlich wie möglich. Daher wird das für die Teigbereitung erforderliche Wasser ohne chemische Aufbereitung eingesetzt. Zur Vermeidung von Kalkproblemen ist eine sogenannte physikalische Wasseraufbereitung in Betrieb. Die Wirkung einer physikalischen Wasseraufbereitung ist in Fachkreisen umstritten; die bisherigen Erfahrungen in der Großbäckerei waren gut. In der Planungsphase wurde daher von einer funktionierenden Wasserenthärtung ausgegangen; es wurden aber dennoch Maßnahmen zum Schutz der Gas/Wasser-Wärmeübertrager ergriffen:

Der Betrieb der beiden Gas/Wasser-Wärmeübertrager (Abhitzekessel und Schwadenkondensator) wurde mit Kreislaufwasser als Zwischenmedium geplant. Die Wärmeübertragung auf das Brauchwarmwasser erfolgt durch preisgünstige und leicht zu entkalkende Wasser-Wasser-Kompaktwärmeübertrager entsprechend Bild 4.2-5.

Das Kreislaufwasser erwärmt zuerst über Wärmeübertrager 2 (WT 2) den Inhalt des neuen Pufferspeichers und anschließend über Wärmeübertrager 1 (WT 1) zufließendes kaltes Wasser. Die restlichen Komponenten der Wärmeeinspeisung in das Warmwasser- und Heizungsnetz der Großbäckerei sind wie folgt geschaltet:

- Der neue Speicher (Speicher „neu“) mit 2 m³ Inhalt wird als Pufferspeicher eingesetzt und auf maximal 95 °C erwärmt
- Über diesen Pufferspeicher wird der Rücklauf der Heizungsanlage geführt, soweit die Rücklauftemperatur unter der Speichertemperatur liegt
- Ursprünglich wurde das Warmwasser über einen mit Erdgas befeuerten Erhitzer (WW-Erhitzer) bereitgestellt. Zwischen Erhitzer und Speicher (Speicher „alt“) sind zwei Wärmeübertrager geschaltet. Der erdgasbefeuerte Erhitzer wird nach Inbetriebnahme der Wärmerückgewinnung nur eingesetzt, wenn die Speichertemperatur unter 56 °C fällt
- Aus dem bestehenden Speicher „alt“ entnommenes Warmwasser wird über den neuen Speicher nachgeliefert. Erreicht der Speicher „alt“ die Maximaltemperatur von 65 °C, wird alternativ über den Wärmeübertrager 1 angewärmtes Kaltwasser nachgeführt. Führt dies weiterhin zu einem Überschreiten der Maximaltemperatur, wird Kaltwasser direkt in den Speicher geleitet
- Liegt die Speichertemperatur des Speichers „neu“ über der des Speichers „alt“, wird der Rücklauf der Warmwasserzirkulation über den Speicher „neu“ geführt. Die Energiezufuhr aus dem Speicher „neu“ wird unterbunden, sobald die Maximaltemperatur des Speichers „alt“ erreicht ist; d.h., der Rücklauf der Warmwasserzirkulation wird wieder direkt in den Speicher „alt“ geführt
- Im Störfall ist weiterhin eine konventionelle Warmwassererwärmung ohne Wärmerückgewinnung möglich

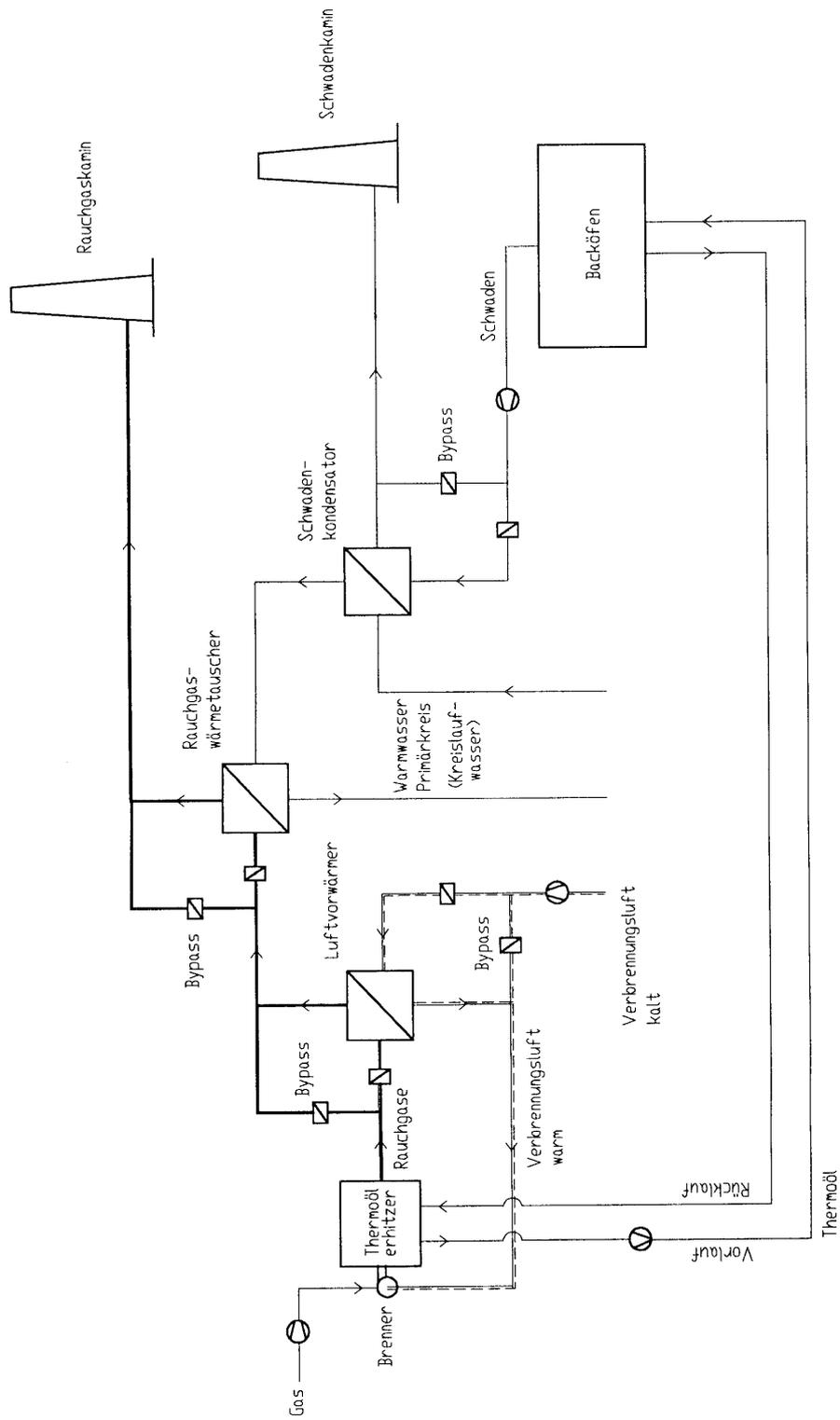


Bild 4.2-4: Wärmerückgewinnung Backofen

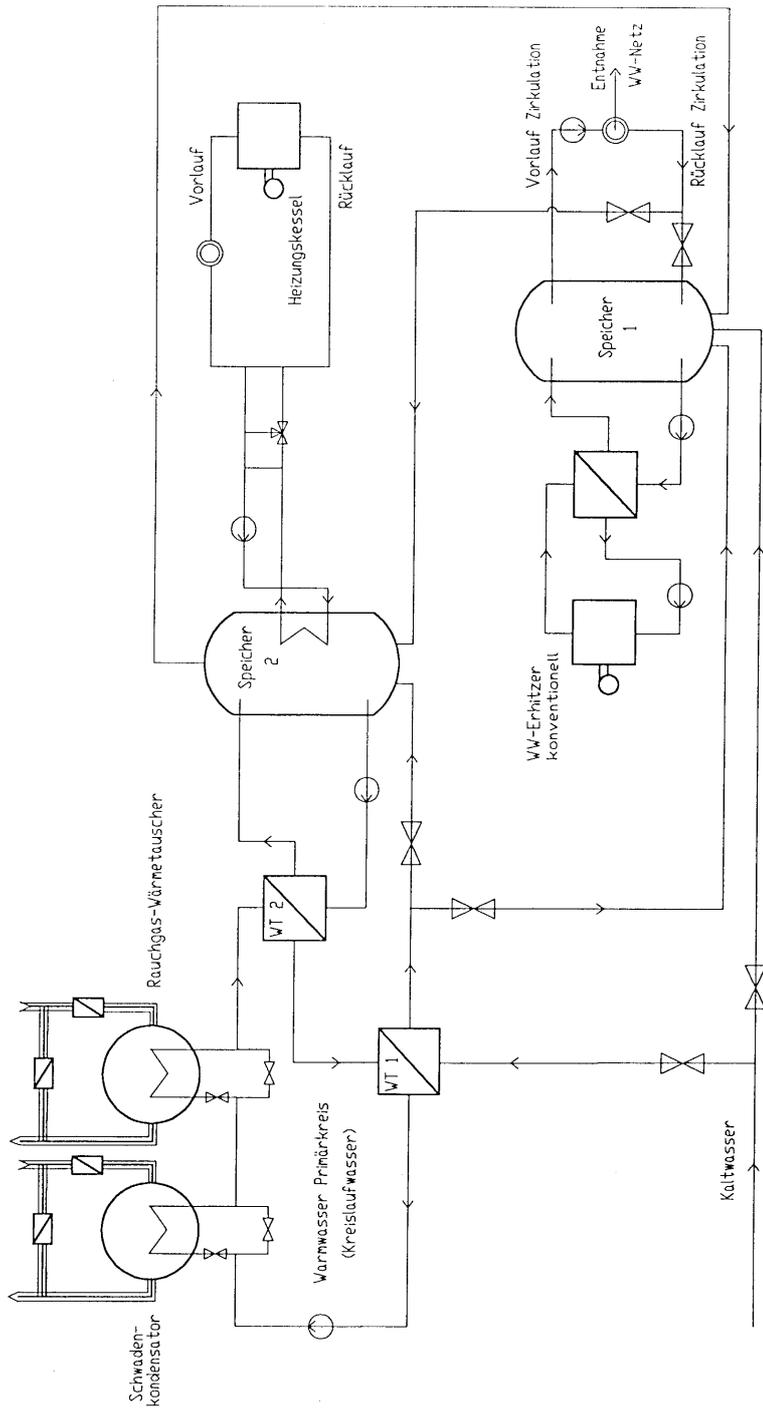


Bild 4.2-5: Wärmeeinspeisung in das bestehende Warmwasser- und Heizungssystem

4.2.3.2 Auslegung der Komponenten

Die Auslegung der Komponenten erfolgte an Hand der von der Betriebsleitung vorgegebenen Produktionszahlen. Zu Beginn der Planung wurde für den Backofen von einer jährlichen Produktionsmenge von 3000 t/a ausgegangen. Dies entspricht einer täglichen Backzeit von ca. 10 Stunden an 6 Tagen pro Woche. Die geplanten Backzeiten und damit die Grundlagen der Planung wurden kurzzeitig sogar auf 15 Stunden pro Tag erhöht, das entspricht einer Produktion von ca. 4500 t/a, da man von einer sehr positiven Absatzentwicklung ausging. Bild 4.2-6 zeigt die tatsächliche Produktionsentwicklung seit der Inbetriebnahme des Ofens (Meto) Ende 1995.

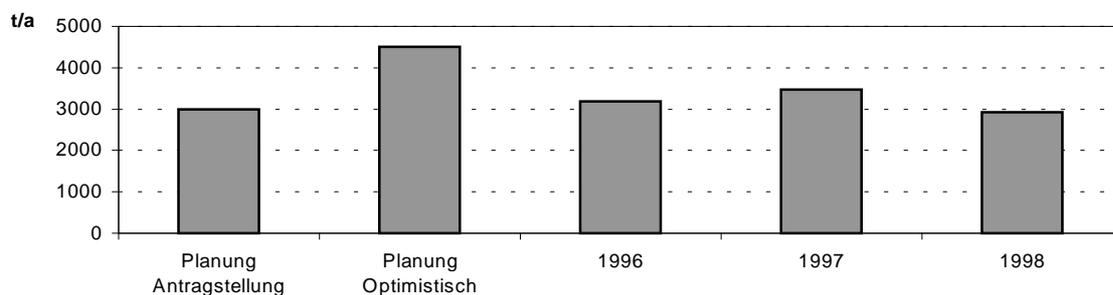


Bild 4.2-6: Produktionsentwicklung Meto: Brotmenge pro Jahr

Bild 4.2-6 zeigt sehr deutlich das erste Problem nach der Realisierung des Projektes: Die Produktionszahlen der optimistischen Einschätzung konnten nicht realisiert werden. Während die Tendenz der Entwicklung 1996 und 1997 noch im Rahmen der erwarteten Entwicklung lag, erfolgte 1998 ein Einbruch beim Absatz. Die wechselnden Essgewohnheiten der Kunden verursachen beim Absatz der verschiedenen Brotsorten Schwankungen. Derzeit nimmt der Absatz von Weizen- und Kastenbrot, die einen Großteil der Produktion des betrachteten Backofens ausmachen, ab. Daher ergab sich 1998 ein Wert von unter 3.000 Tonnen pro Jahr bzw. einer Backzeit von ca. 9,5 Stunden pro Tag.

Für die Zukunft ist wieder mit einer verbesserten Auslastung des Backofens zu rechnen. Der Betreiber fährt derzeit einen stark expansiven Kurs und erwartet entsprechende Produktionssteigerungen. Außerdem ist zu erwarten, dass sich der Ess-Trend wieder zyklisch den Weizen- und Kastenbrot zuwenden wird. Dennoch wird die der Planung zu Grunde liegende Produktion frühestens einige Jahre später als geplant erreicht werden.

Die derzeit gegenüber den Planungsdaten schlechtere Auslastung hat folgende Auswirkungen:

- Die Kapitalrückflusszeit der Komponenten der Wärmerückgewinnung nimmt zu, da die Wärmerückgewinnung und damit der jährliche Kapitalrückfluss niedriger ausfällt als erwartet
- Der spezifische Verbrauch des Ofens steigt

4.2.3.3 Betriebsergebnisse

Ofen und Verbrennungsluftvorwärmung

Bild 4.2-7 zeigt den typischen Einsatz des Ofens an einem Werktag. Man kann sehr gut die Aufheizphase erkennen. Es schließt sich eine Pause zur Temperaturhomogenisierung an, bevor der eigentliche Backvorgang beginnt. Der Ofen wird abgeschaltet, sobald das letzte Brot den Ofen verlässt.

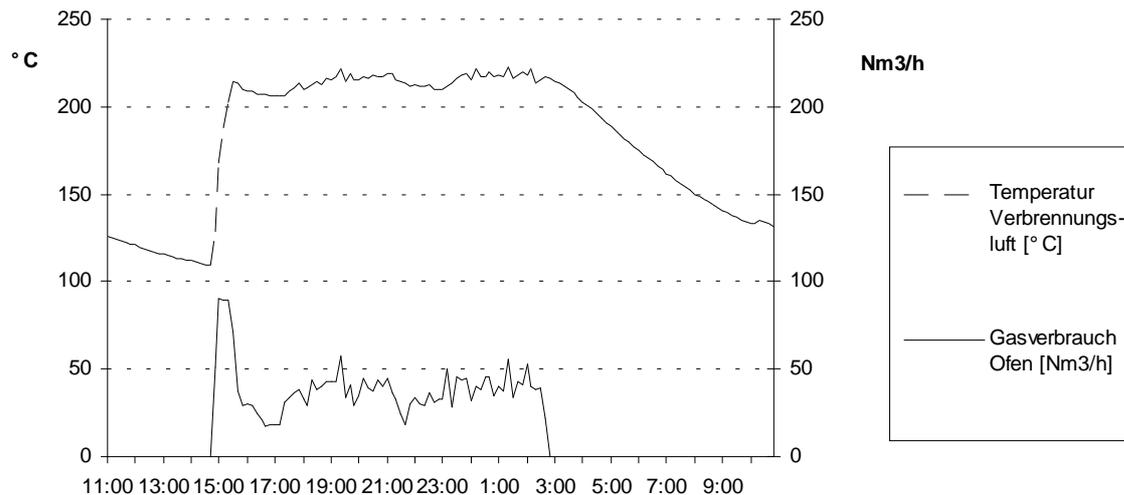


Bild 4.2-7: Erdgaseinsatz und Verbrennungslufttemperatur am untersuchten Ofen an einem normalen Werktag

Berechnet man den spezifischen Verbrauch des Ofens während des in Bild 4.2-7 dargestellten Backvorgangs ohne Berücksichtigung der Aufheizphase, ergeben sich 0,383 kWh/kg Brot. Werden die Aufheizphase und die Pause zwischen Aufheizen und Backen mit berücksichtigt, ergeben sich 0,495 kWh/kg Brot.

Während der gesamten Messperiode lag der spezifische Energieverbrauch inklusive aller Aufheizphasen bei 0,467 kWh/kg Brot, etwas unterhalb des Wertes von dem in Bild 4.2-7 dargestellten Beispiel.

Analysiert man die spezifischen Verbräuche jeweils für Monatswerte, ergibt sich das in Bild 4.2-8 gezeigte Ergebnis. Im dargestellten Produktionsbereich zwischen 225 t Brot pro Monat (ca. 8,5 h Backzeit pro Tag) und 267 t Brot pro Monat (ca. 10 h Backzeit pro Tag) ergibt sich eine deutliche Reduzierung des spezifischen Energieverbrauchs mit zunehmender Backzeit.

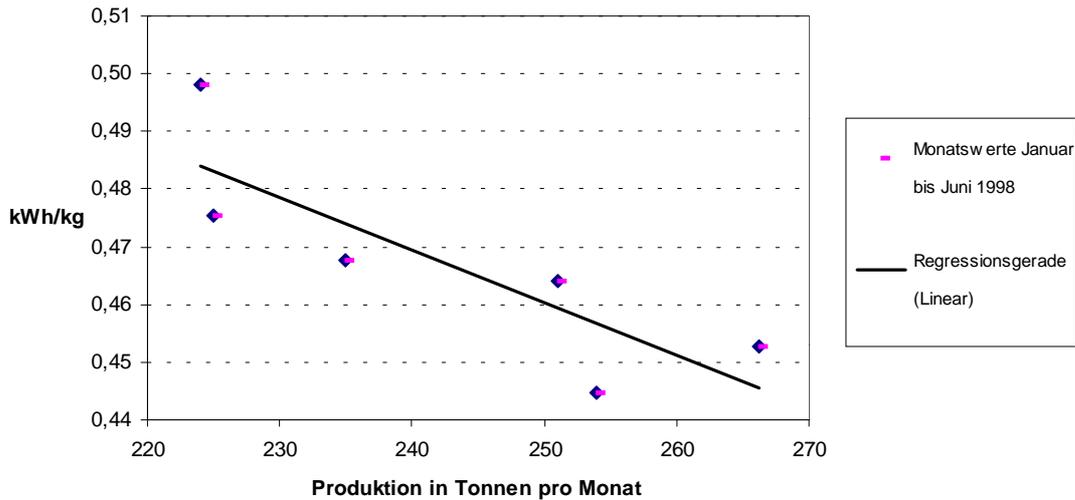


Bild 4.2-8: Abhängigkeit des spezifischen Verbrauchs von der produzierten Menge jeweils für Monatswerte

Der Nutzungsgrad des Kessels erhöhte sich durch die Verbrennungsluftvorwärmung von 86,3 auf 94,3 %. Es ergaben sich die folgenden Mehr- und Minderverbräuche an Gas bzw. Strom:

	Pro Jahr
Gas-Einsparung	126.986 kWh
Strom-Mehrverbrauch	4.815 kWh

Für eine Betrachtung der Ergebnisse im Hinblick auf ihre Übertragbarkeit auf Anlagen mit besserer Auslastung stellt sich die Frage, ob bei Voll- oder Teillast Wirkungsgradunterschiede auftreten. Während des Aufheizvorganges (80 bis 90 % Vollast) liegt die Verbrennungslufttemperatur nur um 10 K niedriger als beim Backbetrieb (35 bis 40 % Vollast). Der Wirkungsgradunterschied liegt bei 0,3 Prozentpunkten.

Einbindung der Wärme in das Warmwasser- und Heizungsnetz

Ein weiteres Problem ergab sich nach einigen Monaten störungsfreien Betriebes. Im Bereich der Wärmerückgewinnung traten erhebliche Probleme mit der Verkalkung verschiedener Komponenten auf, die im Folgenden näher erläutert werden.

Der Betrieb fährt mit einer physikalischen Wasserenthärtung, mit der er bis jetzt noch keine Probleme hatte, allerdings bei einer Wassertemperatur von unter 65 ° C. Laut Hersteller der Wasserenthärtung sollten auch höhere Wassertemperaturen (bis 95 ° C) kein Problem darstellen. Die Betriebsleitung beschloss auf Grund dieser Aussage Temperaturen von bis zu 95 ° C im Warmwassersystem zuzulassen. Leider hatte die vorhandene physikalische Wasserenthärtung auf das Ablagerungsverhalten des Kalkes in Armaturen und Wärmeübertragern keinen spürbaren Einfluss, zumindest bei Warmwassertemperaturen von über 65 ° C.

Durch die Temperaturerhöhung auf bis zu 95 ° C traten massive Verkalkungsprobleme auf. Art und Umfang der Verkalkung ließ auf eine praktisch nicht funktionierende Entkalkung schließen.

Eine Umstellung auf andere Wasserenthärtungsmaßnahmen (z. B. Ionentauscher) kommt aus Gründen der Produktionsphilosophie nicht in Frage.

In einem ersten Versuch wurde in Zusammenarbeit mit dem Hersteller der Anlagen zur physikalischen Wasserenthärtung ein Konzept mit mehrmaliger physikalischer Wasserenthärtung entwickelt. Der Einbau weiterer 3 Enthärtungsanlagen brachte jedoch auch kein zufriedenstellendes Ergebnis.

Als direkte Reaktion zur zumindest kurzfristigen Behebung des Problems wurde die Warmwassertemperatur auf unkritische 65 ° C (statt 95 ° C) begrenzt. Neben den geringeren Wärmerückgewinnungsgraden auf der Warmwasserseite hatte dies zur Folge, dass beim bestehenden Konzept eine Wärmeeinkopplung in das Heizungsnetz nicht möglich war, da die Speichertemperatur unter der Temperatur des Heizungsrücklaufes lag.

Da derzeit die Abwärmeabnahme geringer ist als geplant, liegt die Temperatur des Kreislaufwassers und damit die Temperatur der Sekundärseite der Wärmeübertrager über den Planungsdaten. Die folgende Tabelle 4.2-2 zeigt den Anteil der Wärmerückgewinnung am gesamten Energieeinsatz für die Warmwasserbereitung.

Zeitraum	Anteil der Wärmerückgewinnung am gesamten Energieeinsatz für die Warmwasserbereitung	Daraus folgende Einsparung
	%	kWh/a
Bestwert kurz nach der Inbetriebnahme Anfang 1996	90	229.899
7.12.96 – 10.1.97	68	173.701
Erstes Halbjahr 1998	52	133.772

Tabelle 4.2-2: Anteil der Wärmerückgewinnung am gesamten Energieeinsatz für die Warmwasserbereitung für verschiedene Zeiträume

4.2.3.4 Betriebswirtschaftliche Ergebnisse

Verbrennungsluftvorwärmung

Zur Realisierung der Verbrennungsluftvorwärmung waren Investitionen von knapp unter 100.000 DM notwendig. Nicht beinhaltet sind hierbei Investitionen, die auch ohne Wärmerückgewinnung notwendig gewesen wären, wie z. B. der Brennergrundpreis (ohne Preiszuschlag für die Verbrennungsluftvorwärmung) oder die Querschnittsreduzierung des Kamins.

Um die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Anwendungsfälle zu erleichtern, wurden verschiedene Eingangsgrößen variiert:

Backzeit:

- 9,5 Stunden pro Tag an 6 Tagen die Woche (derzeitige Backzeit)
- 19 Stunden pro Tag an 6 Tagen die Woche (maximal mögliche Backzeit in der untersuchten Bäckerei)
- 24 Stunden pro Tag an 6 Tagen die Woche (nur möglich bei der Produktion von verpackter Ware oder Dauerbackware)

Auslastung des Thermoölerhitzers:

- 37 % der Volllast (Auslastung bei Betrieb von einem Backofen pro 1,08 MW Thermoölerhitzer)
- 74 % der Volllast (Auslastung bei Betrieb von zwei Backöfen pro 1,08 MW Thermoölerhitzer)

Anlagengröße:

- ein zentraler Thermoölerhitzer mit 1,08 MW und ein oder zwei angeschlossene Backöfen
- ein zentraler Thermoölerhitzer mit 2,16 MW mit einer Auslastung, die vier angeschlossenen Backöfen entspricht
- ein zentraler Thermoölerhitzer mit 3,24 MW mit einer Auslastung, die sechs angeschlossenen Backöfen entspricht
- ein zentraler Thermoölerhitzer mit 4,32 MW mit einer Auslastung, die acht angeschlossenen Backöfen entspricht

In Tabelle 4.2-3 wurden die Amortisationszeiten der verschiedenen Varianten dargestellt
Es gilt Folgendes:

- Die Energieeinsparung wurde mit dem Programmpaket berechnet
- Die Kostendegression mit zunehmender Anlagengröße wurde entsprechend /17/ berücksichtigt

Laufende Nummer	1	2	3	4	5
Feuerungswärmeleistung des Thermoölerhitzers in MW	1,08	1,08	2,16	3,24	4,32
Anzahl der parallel geschalteten Backöfen in Stück	1	2	4	6	8
Auslastung des Thermoölerhitzers in der Backphase: in % der Vollast	37	74	74	74	74
Amortisationszeiten (statische Betrachtung) in Jahren					
Backbetrieb 9,5 Stunden pro Tag 6 Tage die Woche	21,8	10,8	8,4	7,2	6,6
Backbetrieb 19 Stunden pro Tag 6 Tage die Woche	12,6	6,3	4,9	4,2	3,8
Backbetrieb 24 Stunden pro Tag 6 Tage die Woche	10,6	5,3	4,1	3,5	3,2

Tabelle 4.2-3: Verbrennungsluftvorwärmung: Amortisationszeiten

Bild 4.2-9 zeigt, beispielhaft für 19 h Backbetrieb pro Tag, die Abhängigkeit der Amortisationszeit

- von der Anlagengröße (laufende Nummerierung entsprechend Tabelle 4.2-2)
- vom Energiepreis für zwei Varianten: dem heutigen Energiepreis und dem 2,7-fachen des heutigen Energiepreises. Dies entspricht auf heutiges Preisniveau hochgerechnet, dem Energiepreisniveau von 1982-1985 (im Bild als altes Energiepreisniveau bezeichnet).

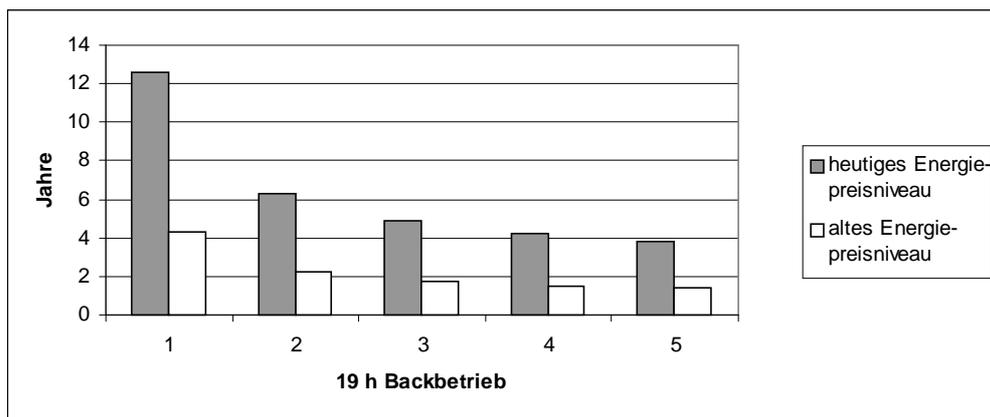


Bild 4.2-9: Abhängigkeit der Amortisationszeiten von Anlagengröße und Energiepreis

Wärmerückgewinnung zur Warmwasserbereitung und Raumwärmebedarfsdeckung

Zur Realisierung der Wärmerückgewinnung zur Warmwasserbereitung und Raumwärmebedarfsdeckung waren Investitionen von knapp unter 200.000 DM notwendig.

Um die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Anwendungsfälle zu erleichtern, wurden ebenfalls verschiedene Eingangsgrößen variiert:

Bezüglich Backzeit, Auslastung des Thermoölerhitzers und Anlagengröße kann auf den Abschnitt über die Luftvorwärmung verwiesen werden. Hinzu kommt die Variation der Speichertemperatur:

- 65 ° C, entsprechend einem Betrieb der Wärmerückgewinnung ohne Wasserenthärtung
- 95 ° C, entsprechend einem Betrieb der Wärmerückgewinnung mit Wasserenthärtung

In Tabelle 4.2-4 wurden die Amortisationszeiten der verschiedenen Varianten dargestellt. Es gilt Folgendes:

- Die Energieeinsparung wurde mit dem Programmpaket berechnet
- Die Kostendegression bei größeren Anlagen wurde entsprechend /17/ berücksichtigt
- Es wird von einer linearen Kopplung zwischen Warmwasserbedarf und Ofeneinsatz ausgegangen

Laufende Nummer	1	2	3	4	5
Feuerungswärmeleistung des Thermoölerhitzers in MW	1,08	1,08	2,16	3,24	4,32
Anzahl der parallelgeschalteten Backöfen in Stück	1	2	4	6	8
Auslastung des Thermoölerhitzers in der Backphase: in % der Vollast	37	74	74	74	74
Amortisationszeiten (statische Berechnung) in Jahren					
Speichertemperatur 65 ° C Backbetrieb 9,5 Stunden pro Tag 6 Tage die Woche	33,2	15,0	11,8	10,1	9,3
Speichertemperatur 95 ° C Backbetrieb 9,5 Stunden pro Tag 6 Tage die Woche	15,9	7,6	6,0	5,2	4,8
Speichertemperatur 95 ° C Backbetrieb 19 Stunden pro Tag 6 Tage die Woche	9,4	4,5	3,5	3,0	2,8
Speichertemperatur 95 ° C Backbetrieb 24 Stunden pro Tag 6 Tage die Woche	8,1	3,8	3,0	2,6	2,4

Tabelle 4.2-4: Wärmerückgewinnung zur Warmwasserbereitung und Raumwärmebedarfsdeckung: Amortisationszeiten

Bild 4.2-10 zeigt beispielhaft für 19 h Backbetrieb pro Tag und 95 ° C Speichertemperatur die Abhängigkeit der Amortisationszeit

- von der Anlagengröße (laufende Nummerierung entsprechend Tabelle 4.2-2)
- vom Energiepreis für zwei Varianten: dem heutigen Energiepreis und dem 2,7-fachen des heutigen Energiepreises. Dies entspricht auf heutiges Preisniveau, inflationsbereinigt hochgerechnet, dem Energiepreisniveau von 1982-1985 (im Bild als altes Energiepreisniveau bezeichnet)

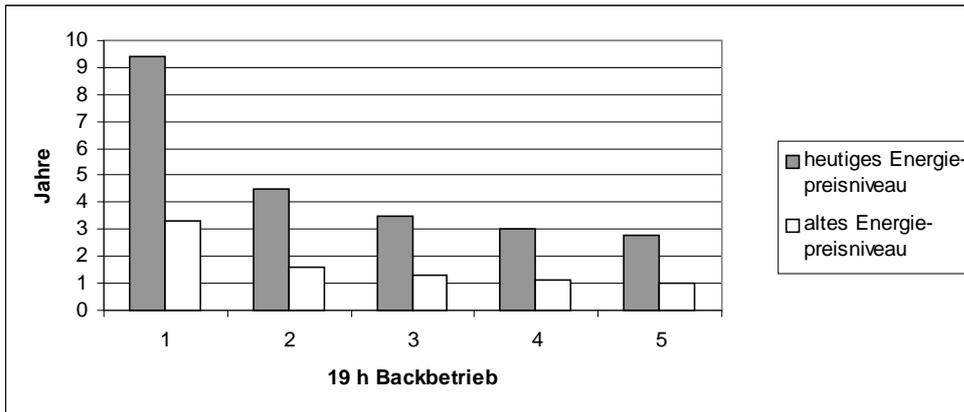


Bild 4.2-10: Abhängigkeit der Amortisationszeiten von Anlagengröße und Energiepreis

Gesamtkommentar zur betriebswirtschaftlichen Betrachtung

Die Amortisationszeiten liegen bei der tatsächlich realisierten Anlage, sowohl bei der Verbrennungsluftvorwärmung als auch bei der sonstigen Wärmerückgewinnung, sehr hoch. Bei diesem Vorhaben wurde bewusst auf die untere Leistungsgröße der auf dem Markt verfügbaren Komponenten zurückgegriffen. Entsprechend sensibel reagieren die Amortisationszeiten auf kleine Änderungen bei den bei der Projektierung getroffenen Annahmen.

Die Amortisationszeiten werden mit verbesserter Auslastung und/oder größeren Anlagen und natürlich höheren Energiepreisen schnell erheblich günstiger. Für Bäckereien ist mit der betrachteten Obergrenze von 4,32 MW für einen Thermoölerhitzer mit Sicherheit die sinnvolle Obergrenze erreicht. Bei anderen Energieanwendungstechniken, die sich ebenfalls für Verbrennungsluftvorwärmung eignen (z. B. Dampferzeugung) stellen Dampferzeuger mit etwas über 4 MW eher die kleineren Anlagen dar.

In Bäckereien ist dem einzelnen Backofen normalerweise eine separate Feuerung (von wenigen kW bis maximal etwas über einem MW) zugeordnet. Wegen Transportproblemen beim Rauchgas ist dies bei herkömmlichen Rauchgasumwälzöfen unvermeidbar. Leider wird dies auch bei thermoölbeheizten Backöfen praktiziert. Es macht durchaus Sinn, die gesamte Feuerungswärmeleistung einer Bäckerei nicht nur auf eine, sondern auf zwei bis drei Feuerungen zu konzentrieren. Bei Ausfall eines Erhitzers kann dann der Betrieb noch aufrechterhalten werden. Eine Anschaffung von jeweils einer Thermoölanlage für jeden Backofen bindet jedoch unnötig hohe Geldmittel und macht Wärmerückgewinnungsmaßnahmen wegen der geringen Feuerungswärmeleistung der einzelnen Anlagen unwirtschaftlich.

4.2.3.5 Vergleich mit anderen Ofensystemen

Parallel zum vorgestellten Ofensystem wird an der untersuchten Bäckerei mit folgenden zwei Systemen produziert:

- altdeutsche Steinbacköfen mit 30 Herden, einem direkt zugeordneten Vorbackofen und einem, gemeinsam mit dem Plattenbandofen genutzten Dampferzeuger
- ein Plattenbandofen mit einem direkt zugeordneten Vorbackofen und einem, gemeinsam mit den Steinbacköfen genutzten Dampferzeuger

Bild 4.2-11 zeigt die spezifischen Verbräuche des vorgestellten Ofensystems (Meto) und der anderen Ofensysteme im grafischen Vergleich. Bei der Bewertung dieses Ergebnisses muss beachtet werden, dass es sich um einen Vergleich zwischen einem neuen und einem alten Ofensystemen handelt und dass auch die Produktpalette nicht ganz übereinstimmt.

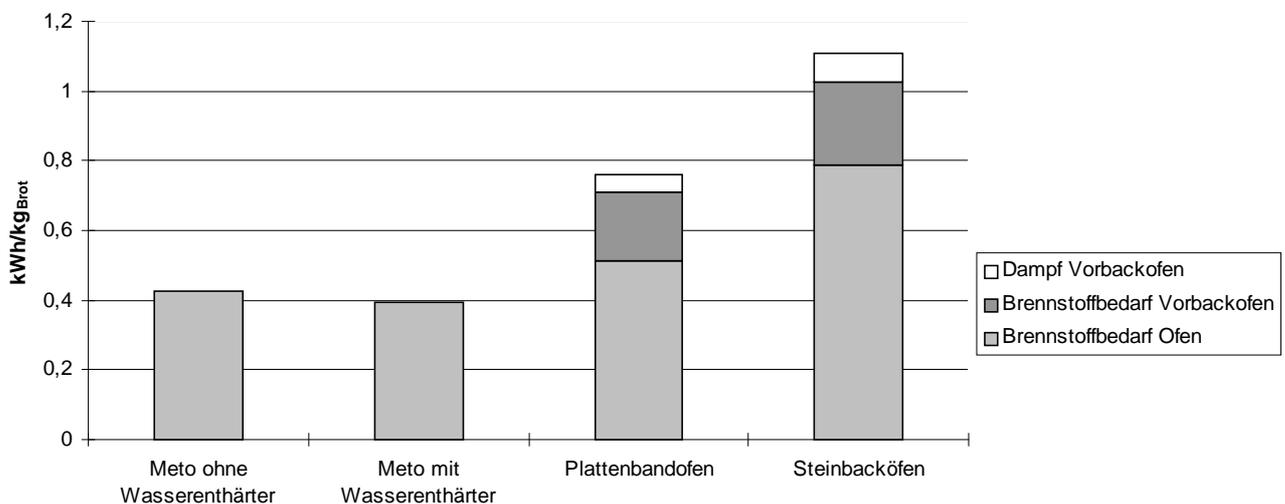


Bild 4.2-11: Spezifische Energieverbräuche der Ofensysteme der untersuchten Bäckerei (die Werte für den Meto gelten inklusive ofeninternem Vorbackprozess und ofeninterner Erzeugung des Beschwadungsdampfes)

4.2.3.6 Änderung der Wärmerückgewinnung

Nachdem die Betriebsleitung nicht bereit war, auf ein anderes, für die Wärmerückgewinnung unkritisches Entkalkungskonzept umzustellen, wurde überlegt, wie dennoch hohe Wärmerückgewinnungsgrade gefahren werden könnten.

Bild 4.2-12 zeigt das modulare Schaltbild der Wärmeeinspeisung in das bestehende Warmwasser- und Heizungssystem (Beschreibung Kapitel 4.2.3.1, Schaltbild Bild 4.2-5). Zusätzlich zur bestehenden Anlage ist gestrichelt die neue Konzeption eingezeichnet (nicht mehr benötigte Verbindungen sind durch ein gestricheltes X gekennzeichnet).

Der Heizungsrücklauf wird nicht mehr über den Speicher 2 geführt, sondern in einem weiteren Wärmeübertrager durch das Zwischenkreismedium erwärmt. Der Wärmeübertrager ist so ausgelegt, dass das 95-grädige Zwischenkreismedium auf unkritische

4.3 Optimierung eines größeren Betriebes in mehreren Schritten

Am folgenden Beispiel soll das schrittweise Optimieren eines größeren Betriebes von der einzelnen Anlage über größere zusammenhängende Fertigungsschritte bis zur zentralen Energieversorgung aufgezeigt werden.

Als Beispiel wurde ein Automobilhersteller gewählt /18/.

Die folgenden Ausschnitte aus dem gesamten Beispiel wurden hier genauer dargestellt:

- Optimierung einer Anlage: Die energetische Optimierung eines Lackrockners
- Optimierung eines Fertigungsschrittes: Die Verknüpfung von Wärmequellen und Wärmesenken innerhalb der Lackierhalle
- Optimierung des gesamten Werkes: Die energetische Optimierung der zentralen Energieversorgung

4.3.1 Optimierung eines Lackrockners

Im untersuchten Trockner werden frisch lackierte Automobilkarossen getrocknet.

Der Trockner ist als Doppelstrangtunnel auf einer Stahlgerüstkonstruktion aufgebaut und wird mit Erdgas betrieben. In der Einlauf- bzw. Auslaufschleuse befinden sich Hebe- bzw. Senkeinrichtungen. Die lackierten Karossen werden abwechselnd auf die beiden Linien (Stränge) verteilt.

Beide Trocknerstränge haben unabhängige Beheizungseinrichtungen.

Die Trocknerlinien sind in drei Sektionen aufgeteilt:

- Aufheizzone 1:
Hoher Strahlungsanteil durch Infrarotstrahlungsflächen für die Seiten- und Boden-
gruppen der Karossen. Zusätzlich dazu unterstützt ein Umluftstrom die Aufheizung von
Front-, Dach- und Heckpartien.
- Aufheizzone 2:
Reduzierter Strahlungsanteil durch speziell angeordnete Infrarotstrahlungsfläche im
Bereich von Schwellen und Bodengruppe. Ein gefilterter Umluftanteil sorgt für die
Vergleichmäßigung der Objekttemperatur.
- Haltezone bzw. Konvektionszone:
Sie dient zur Aushärtung des Decklacks bei konstanter Temperatur mit Umluft und ohne
Infrarot-Strahler.

Bild 4.3-1 zeigt das Wärmeschaltbild von Decklacktrockner 2. Es wird zur Vereinfachung nur die Beheizungseinrichtung eines Stranges gezeigt. Die Beheizungseinrichtung des zweiten Stranges ist identisch aufgebaut.

Die Wärme für den Trocknertunnel wird in einer thermischen Nachverbrennungsanlage (TNV) erzeugt. Aus dem Trockner wird ein Teil (6.500 kg/h) der lösemittelhaltigen Luft entnommen und der TNV zugeführt. Ein integrierter Röhren-Wärmeübertrager wärmt diesen Luftstrom mithilfe des die TNV verlassenden, im Weiteren als „Reingas“

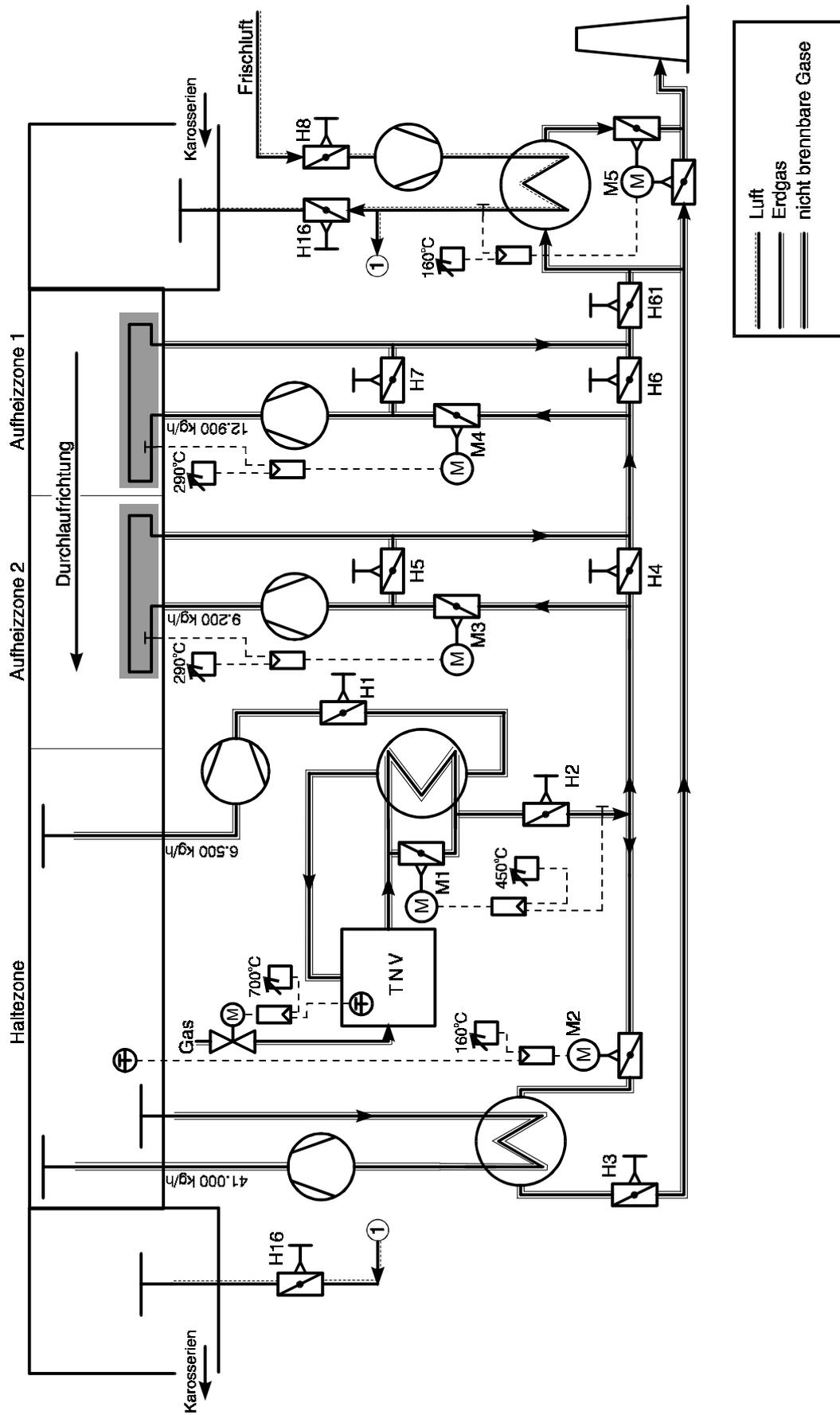


Bild 4.3-1: Wärmesaltbild Decklacktrockner 2

bezeichneten Gasstroms auf ca. 450 ° C vor. Anschließend wird Erdgas zugemischt und bei 700 bis 760 ° C verbrannt. Die untere Grenze von 700 ° C ist dabei gesetzlich vorgeschrieben und unbedingt einzuhalten. Die Restkonzentration an Kohlenwasserstoffen im Reingas liegt weit unter 20 mg CH/m³. Die Oxidation der Schadstoffe erbringt nur einen Bruchteil der erzeugten Wärme, der Hauptanteil wird mit dem Erdgas zugeführt.

Die heißen Abgase der TNV werden über den Röhren-Wärmeübertrager und dann mit ca. 455 ° C in einen Sammelkanal („Reingaskanal“) geleitet. Sie dienen zur Beheizung der Strahlungsflächen in den beiden Aufheizzonen und parallel dazu zur Beheizung der Umluft der Haltezone.

Anschließend gibt das Reingas über einen Wärmeübertrager einen Teil der in ihm noch enthaltenen Energie an die Frischluft ab, die als Ersatz für die in der Haltezone abgesaugten Luft in der Ein- und Ausgangsschleuse zugeführt wird.

Nach dem Frischluft-Wärmeübertrager wird das Reingas mit 230 bis 290 ° C über einen Kamin an die Umgebung abgegeben.

Bild 4.3-2 zeigt die Energiebilanz des Trockners inklusive aller An- und Abfahrverluste.

58 % der eingesetzten Energie bzw. 3.336 MWh/a werden, an das Reingas gebunden, mit 230 bis 290 ° C an die Umgebung abgegeben.

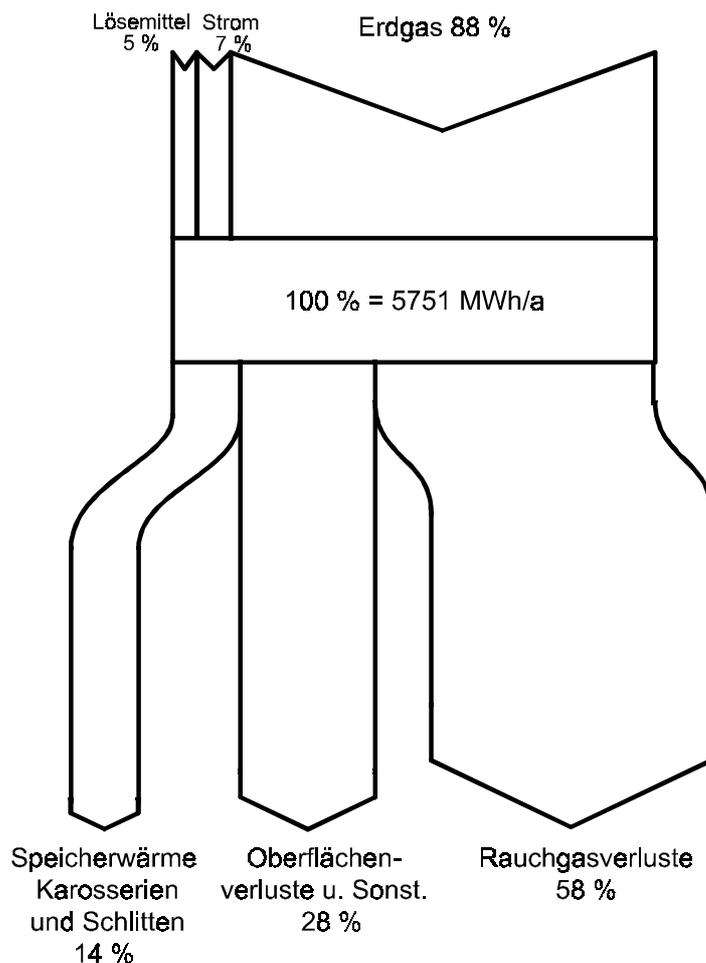


Bild 4.3-2: Energiebilanz des Decklacktrockners 2 inkl. aller An- und Abfahrverluste

Bei den Überlegungen zur Energieverbrauchsreduzierung beim untersuchten Trockner ergaben sich folgende Möglichkeiten, vorerst noch unabhängig davon, ob für den Neubau oder für eine Nachrüstung des Trockners:

1. Problemlos durchführbare Maßnahmen:

Von Seiten des Herstellers und der technischen Leitung der Lackiererei ist es kein Problem, den Abluftstrom aus der Haltezone um 30 % zu reduzieren. Dann ist es aber notwendig, die mit dem Reingas versorgten Verbraucher nach folgender Reihenfolge anzuordnen (d. h. die Parallelschaltung der Infrarotstrahlungsflächen der Aufheizzone und dem Wärmeübertrager für die Umluft der Haltezone aufzuheben), da ansonsten die Aufheizzone nicht genügend Energie erhält:

- Infrarotstrahlungsflächen Aufheizzone 1
- Infrarotstrahlungsflächen Aufheizzone 2
- Wärmeübertrager Umluft Haltezone
- Wärmeübertrager Frischluft Einlaufzone (und Auslaufzone)
- Wärmeübertrager Frischluft Auslaufzone (neu, siehe unten)

Damit sind auch die Verbraucher energetisch und exergetisch sinnvoll entsprechend ihres Temperaturniveau geordnet.

Beim Wärmeübertrager Umluft Haltezone kann das niedrigere Temperaturniveau durch einen etwas höheren Massenkapazitätsstrom ausgeglichen werden, da der Wärmeübertrager für die derzeitige Anwendung reichlich dimensioniert ist.

Der Wärmeübertrager Frischluft Ein- und Auslaufzone ist zu klein, um die Frischluftströme von Ein- und Auslauf auf die geforderten 160 °C zu erwärmen, kann aber problemlos den Einlauf versorgen. Damit ist ein zusätzlicher Wärmeübertrager zur Erwärmung der Frischluft für die Auslaufzone notwendig. Dieser kann so dimensioniert werden, dass die Zuluft der Auslaufzone nur auf 100 °C erwärmt wird, die restliche Erwärmung auf ca. 160 °C erfolgt durch die abgeführten heißen Karossen.

2. Aufwändigere Maßnahmen:

Der Abluftstrom aus der Haltezone wird wie in 1. um 30 % reduziert, und die Verbraucher werden in der in 1. beschriebenen Reihenfolge angeordnet.

Der Wärmeübertrager der TNV wird so weit vergrößert, dass im Normalbetrieb mit der reduzierten Abluftmenge, die für die Strahlungszone geforderten 450 °C Eingangstemperatur exakt eingehalten werden (beim derzeitigen Betrieb und bei einem Betrieb nach 1. liegt die Temperatur am Ausgang der TNV höher).

In Folge müssen alle weiteren Wärmeübertrager (nicht die Infrarotstrahlungsflächen) vergrößert werden. Dies entspricht bei einer Nachrüstung eines bestehenden Trockners einer Erneuerung aller Wärmeübertrager.

3. Maximale Maßnahmen:

Der Abluftstrom aus der Haltezone wird wie in 1. um 30 % reduziert, und die Verbraucher werden in der in 1. beschriebenen Reihenfolge angeordnet.

Es werden außerdem alle Wärmeübertrager (auch der der TNV) so weit vergrößert, dass eine Abkühlung des Reingases auf das absolute Minimum (40 °C am Kaminaustritt)

erfolgt.

Damit ist auch eine Absenkung der Reingastemperatur nach der TNV bzw. vor der Strahlungszone, d. h. eine Vergrößerung der Infrarotstrahlungsflächen, verbunden. Außerdem wird von einer Verlängerung des Auslauftunnels und damit von einer weiteren Wärmerückgewinnung aus den Karossen ausgegangen.

Bei einer Nachrüstung eines bestehenden Trockners wäre dies mit einem weitgehenden Neubau des Trockners verbunden.

Untersucht man die Auswirkungen der einzelnen Maßnahmenbündel mit Hilfe des Programmpaketes, erhält man die in Tabelle 4.3-1 angegebenen Unterschiede bei den Investitionen, Energieverbräuchen und Wärmeübertragerflächen.

	Status quo	Problemlos durchführbare Maßnahmen	Aufwändige Maßnahmen	Maximale Maßnahmen
Energieeintrag über Erdgas und Lösemittel	100 %	55 %	45 %	37 %
Benötigte gesamte Wärmeübertragerfläche	100 %	169 %	389 %	511 %
Für Wärmerückgewinnungsmaßnahmen notwendige Investitionen	100 %	156 %	293 %	369 %
Richtwerte für die Kapitalrückflusszeit des jeweiligen Maßnahmenbündels*	< 1 Jahr	1-2 Jahre	6-8 Jahre	> 10 Jahre

*bei derzeitigen Energiepreisen inkl. 6 % Zins sowie Wartung und Instandhaltung

Tabelle 4.3-1: Unterschiede zwischen den verschiedenen Maßnahmenbündeln

Ergreift man die maximalen Maßnahmen, können 63 % der derzeit für den Trockenvorgang eingesetzten Energie eingespart werden, allerdings bei den fast vierfachen Investitionen für Wärmerückgewinnungsmaßnahmen. Bereits mit den etwas mehr als 1,5-fachen Investitionen können 45 % der derzeit eingesetzten Energie eingespart werden.

Werden Maßnahmen zur vermehrten Wärmerückgewinnung an einem bestehenden Trockner umgesetzt, verlängern sich die Kapitalrückflusszeiten, soweit vorhandene und funktionstüchtige Anlagenkomponenten ausgetauscht werden müssen.

Beim untersuchten Betrieb lagen die Forderungen an die Kapitalrückflusszeit bei 2 Jahren (in Ausnahmefällen auch bis zu 3 Jahren). Dadurch kamen für eine Realisierung nur die problemlos durchführbaren Maßnahmen infrage. Mit den Zusatzkosten für die relativ geringen Änderungen an vorhandenen Komponenten blieb die Kapitalrückflusszeit noch knapp unter 3 Jahre.

4.3.2 Optimierung der Lackierhalle

In der gesamten Lackierhalle sind die folgenden Wärmeverbraucher installiert:

- 7 Trockner
- 5 Spritzkabinen

Die Trockner wurden entsprechend obigem Beispiel aus Kapitel 4.3.1 behandelt. Es ergaben sich je nach Bauart und Temperaturniveau des Trocknungsvorganges stark unterschiedliche Einsparpotenziale zwischen 0 und 45 % bei einer geforderten Kapitalrückflusszeit von 2 bis 3 Jahren. Auf die Optimierung der einzelnen Trockner soll hier nicht weiter eingegangen werden.

Das Quellen-Senken-Verknüpfungsprogramm lieferte für eine Verknüpfung aller Wärmequellen und –senken innerhalb der Lackierhalle die folgenden Ergebnisse:

- Erwärmung der Spritzkabinenfrischluft mit der Abluft der Spritzkabinen (Energieeinsparung siehe Bild 4.3-3). Die Kapitalrückflusszeit liegt bei 2 Jahren und damit innerhalb der Realisierungsvorgaben des Betriebes
- Des Weiteren kann ein Teil der Trocknerabwärme ebenfalls zur Erwärmung der Zuluft der Spritzkabinen herangezogen werden. Die Kapitalrückflusszeiten sind je nach Trockner unterschiedlich, für alle jedoch deutlich über 3 Jahre, eine Realisierung kommt damit nicht infrage

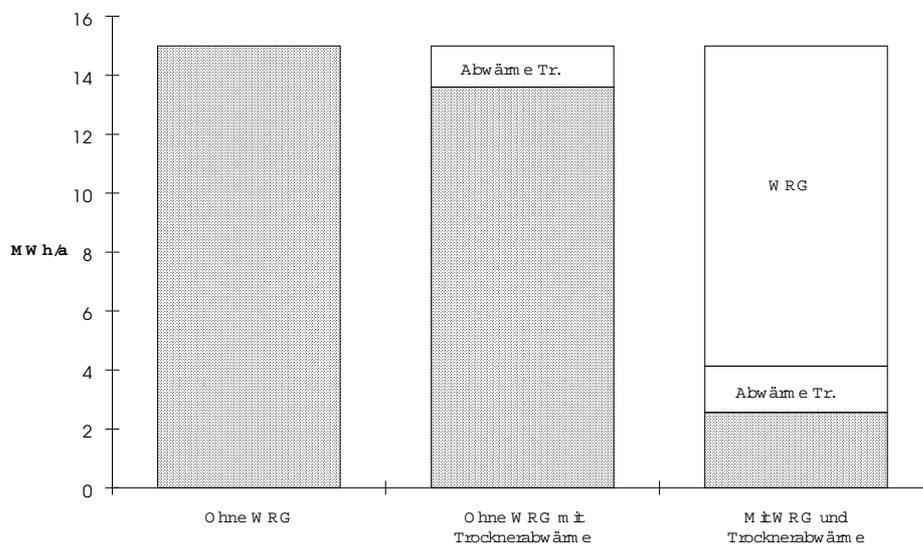


Bild 4.3-3: Leistungsbedarf der Spritzkabinen im Auslegungspunkt bei Wärmerückgewinnung aus der Abluft und Nutzung der Trocknerabwärme

4.3.3 Optimierung der zentralen Energieversorgung

Nach Berücksichtigung der Einspareffekte durch Maßnahmen, deren Realisierung beabsichtigt ist, verbleibt für das gesamte Werk ein nach Stundenmittelwerten aufgliederter Jahresenergiebedarf, dessen Jahresdauerlinie in Bild 4.3-4 dargestellt ist.

Dieser Bedarf muss noch als vorläufig betrachtet werden, da Maßnahmen bei der zentralen Energieversorgung durchaus die Wirtschaftlichkeit nachgeschalteter Einsparmaßnahmen (z. B. in der Lackierhalle) beeinflussen können, wie z. B. durch:

- Veränderte Energieverrechnungspreise
- Gutschriften für vermiedene Leistung (wenn die zentrale Energiebereitstellung ganz oder teilweise erneuert wird)

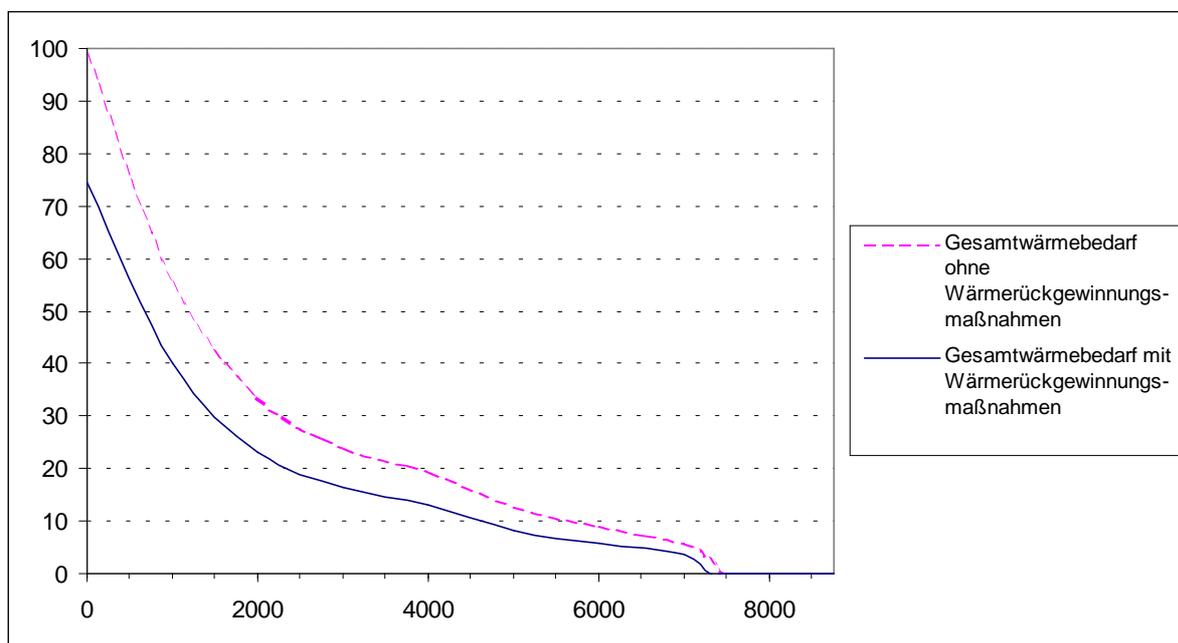


Bild 4.3-4: Wärmebedarf gesamtes Werk mit und ohne Wärmerückgewinnungsmaßnahmen in den versorgten Betriebsteilen

Die derzeitige zentrale Energieversorgung ist in Bild 4.3-5 dargestellt. Sie besteht aus mehreren Dampferzeugern mit zwei nachgeschalteten Kondensatoren zur Heiß- und zur Heizwassererzeugung. Diese Kondensatoren wurden installiert, als das gesamte Werk von Dampfversorgung auf Heiß- und Heizwasserversorgung umgestellt wurde und hierbei die vorhandenen Dampfkessel erhalten bleiben sollten.

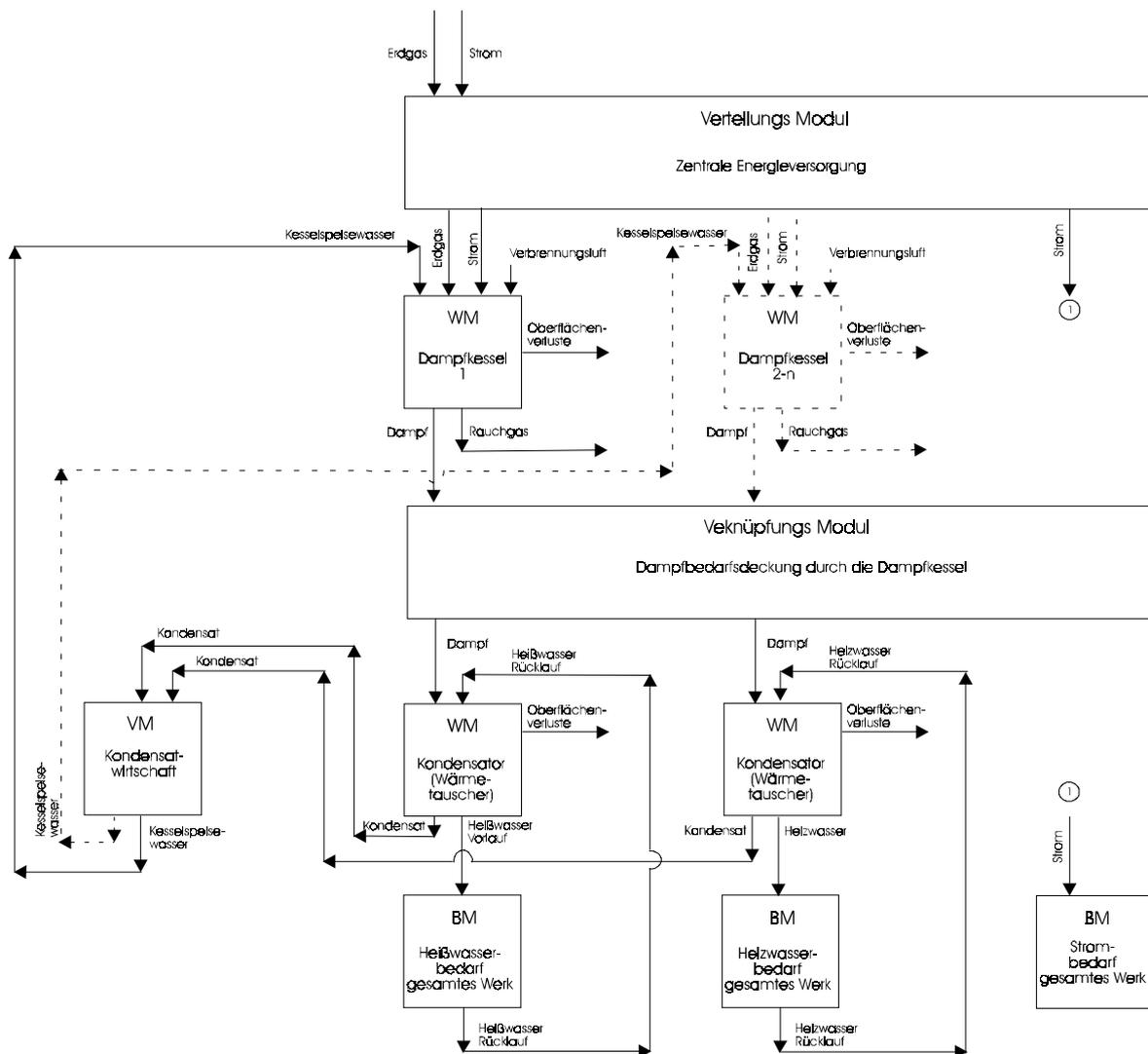


Bild 4.3-5: Derzeitige Heiz- und Heißwasserversorgung des Werkes

In einem ersten Optimierungsschritt wurde der Ersatz einzelner Kessel durch KWK- Anlagen untersucht. Hierbei wurde der - energetisch eigentlich unsinnige - Zwischenschritt der Dampferzeugung und anschließenden Heiß- und Heißwassererzeugung mittels des Dampfes beibehalten. Der Grund hierfür lag in einer Vorgabe der Werksleitung, nach der die bestehenden Dampfkessel sukzessive über einen Zeitraum von mehreren Jahren und nicht zu einem Zeitpunkt stillgelegt werden sollten. Bild 4.3-6 zeigt die zentrale Energieversorgung bei Ersatz eines Kessels durch ein Heizkraftwerk mit Gegendruckturbine, Bild 4.3-7 bei Einsatz einer Gasturbine mit Abhitzekeessel.

Bereits bei diesem ersten Schritt zeigte sich, dass ein Heizkraftwerk mit Gegendruckturbine im Leistungsbereich 10 bis 20 MW wirtschaftlich nicht mit einer Gasturbine mit Abhitzekeessel im selben Leistungsbereich konkurrieren kann.

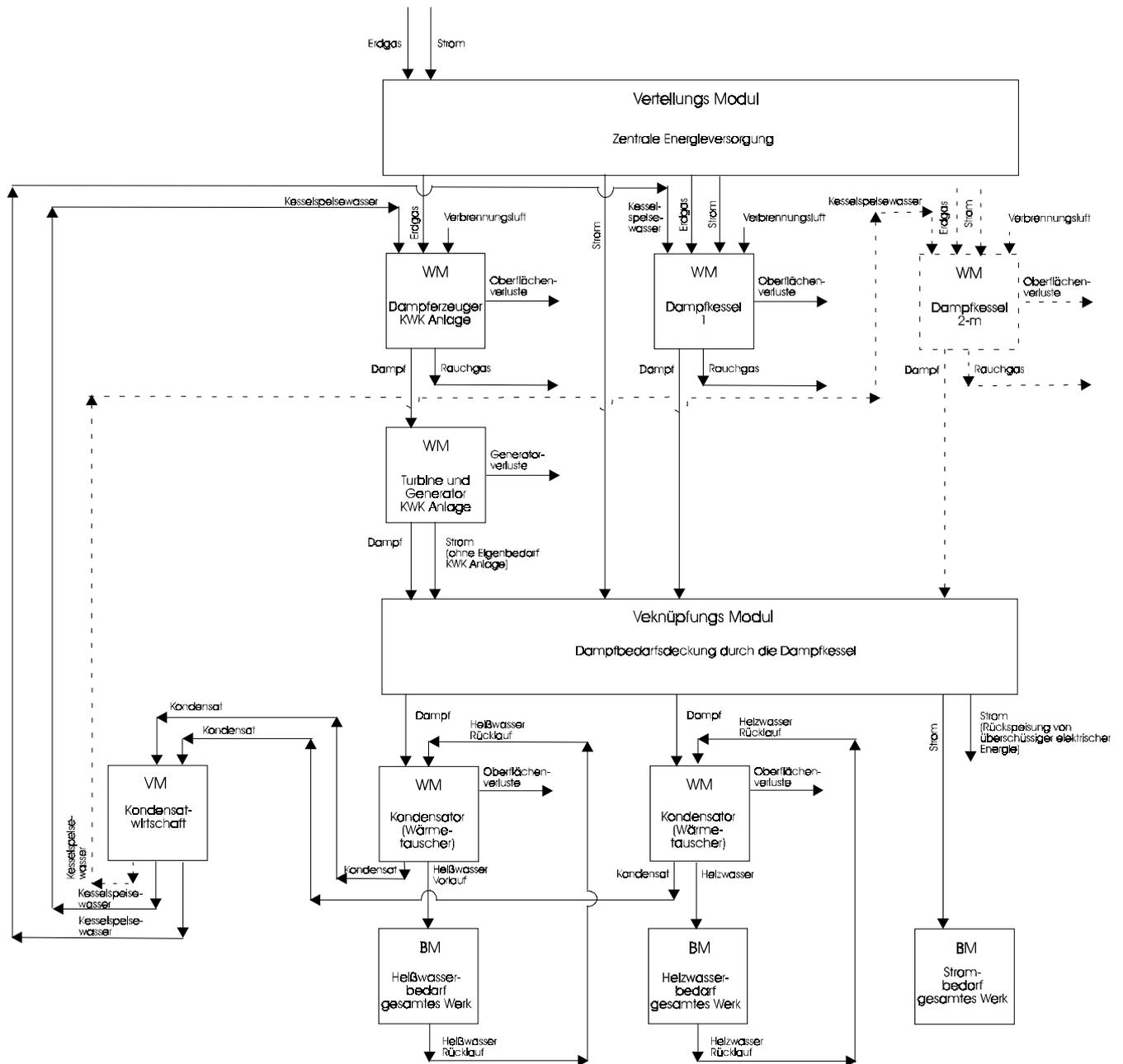


Bild 4.3-6: Heiz- und Heißwasserversorgung des Werkes bei Ersatz eines Dampferzeugers durch ein Heizkraftwerk mit Gegendruckturbine

Bei der Feinoptimierung wurden die folgenden Parameter variiert bzw. die folgenden Ideen überprüft:

- die Aufteilung der Gesamtleistung auf die verschiedenen Dampferzeuger und die Kraft-Wärme-Kopplung
- direkte Erwärmung von Heiß- und Heizwasser ohne den Umweg über die Dampferzeugung
- Kesselspeisewasser- oder Verbrennungsluftvorwärmung mittels der Rauchgase bei den Wärmeerzeugern

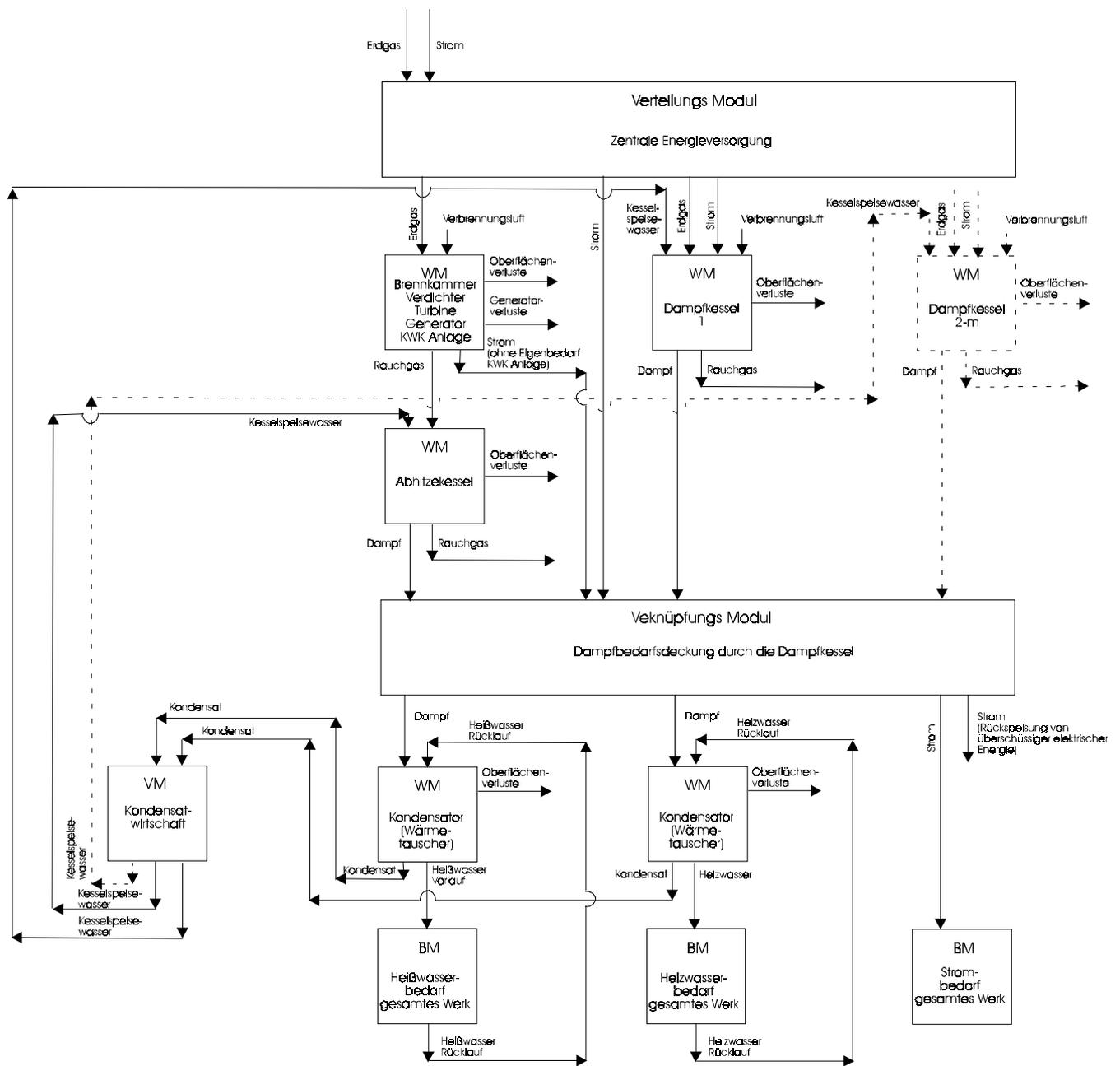


Bild 4.3-7: Heiz- und Heißwasserversorgung des Werkes bei Ersatz eines Dampfzenergers durch eine Gasturbine mit Abhitzekessel

Unter den vorgegebenen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ergab das folgende Konzept das optimale energetische Ergebnis:

- Parallelschaltung einer Gasturbine mit Abhitzeessel zur derzeitigen Energieerzeugung mit:
 - Brennstoffleistung 40 MW
 - elektrischer Nennleistung 11,2 MW
 - bei Betrieb mit Nennleistung zur Verfügung stehender thermischer Leistung: 20 MW

Direkte Bereitstellung von Heißwasser mit dem Abhitzeessel. Kein Umweg über eine Dampferzeugung

- Die bestehenden Dampferzeuger werden schrittweise durch die folgenden Komponenten ersetzt:
 - Kesselgrößen 20 MW, 2 x 10 MW, 7,5 MW und 5 MW thermische Leistung
 - direkte Erwärmung von Heiß- und Heizwasser durch die Kessel ohne den Umweg über die Dampferzeugung
 - direkte Zuordnung des 7,5 MW-Kessels zur Heizwassererzeugung und der restlichen Anlagen (inklusive der KWK-Anlage) zur Heißwassererzeugung. Einbau eines Wärmeübertragers über den mit Heißwasser Heizwasser erwärmt werden kann (zur Spitzenlast- und Kleinlastabdeckung)

Es ergibt sich das folgende Gesamtergebnis:

Vor der Untersuchung lag der Erdgaseinsatz in der zentralen Heiß- und Heizwassererzeugung bei	233.000 MWh/a
Der Heiß- und Heizwasserbedarf des Werkes sank von	209.000 MWh/a
auf	148.000 MWh/a
bzw. um	29,4 %
Dieser neue Bedarf an Heiß- und Heizwasser verursacht bei seiner Deckung mit den alten Kesseln folgenden Erdgaseinsatz	
	164.000 MWh/a
Wird der neue Bedarf an Heiß- und Heizwasser mit neuen Kesseln und unter Verzicht auf den Dampfzwischenkreis gedeckt, ergibt sich ein Erdgaseinsatz von	
	159.000 MWh/a
Es kann der folgende Anteil am gesamten Wärmebedarf durch die KWK-Anlage gedeckt werden	
	54,5 %
Die Stromerzeugung liegt dann bei	
	45.000 MWh/a
Der Erdgaseinsatz für Heiß- und Heizwassererzeugung und Stromerzeugung steigt dadurch auf	
	233.000 MWh/a
Somit steht einem Gas - Mehraufwand von	
	74.000 MWh/a
folgende Stromerzeugung gegenüber	
	45.000 MWh/a

5 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Mit dieser Arbeit konnte erstmalig ein computergestütztes Verfahren zur Energieverbrauchsoptimierung in Industriebetrieben erarbeitet und in der Praxis getestet werden.

Der Energiefluss und die Energieanwendung in Industriebetrieben sind wegen der Komplexität vieler Betriebe schwierig zu verfolgen und als Ganzes kaum mathematisch darstellbar. Daher wurden bei der Entwicklung dieses Verfahrens in einigen Betrieben die innerbetrieblichen Abläufe der Energieanwendung analysiert, mit dem Ziel, kleinste immer wiederkehrende Einheiten (Module) zu finden, mit denen der Energiefluss und die Energieanwendung in jedem beliebigen Betrieb mathematisch einfach dargestellt werden können. Es hat sich gezeigt, dass nur 8 grundlegend unterschiedliche Modultypen, wie z. B. Energietransport, -wandlung oder -speicherung, erforderlich sind, die wiederum leicht dem speziellen Anwendungsfall angepasst werden können.

Die Module beinhalten die Rechenvorschriften, an Hand derer aus bekannten Eingangsgrößen die noch unbekanntes Ausgangsgrößen berechnet werden können. Da die mathematischen Zusammenhänge möglichst einfach gehalten werden sollten, können mit einem Modul nur stationäre Vorgänge beschrieben werden. Nicht stationäre Vorgänge werden als Abfolge mehrerer Intervalle mit stationären Größen an den Ein- und Ausgängen des Moduls dargestellt. Für jedes dieser Intervalle werden die Ein- und Ausgangsgrößen des Moduls neu berechnet. Über die Zeitdauer der Intervalle kann der aus diese Annäherung folgende Fehler reduziert bzw. die Genauigkeit der Betrachtung gesteigert werden.

Zum Start der Berechnungen innerhalb eines Moduls muss mindestens eine Eingangsgröße vorgegeben sein. Dies kann durch die Verschaltung des Eingangs mit dem Ausgang eines weiteren Moduls erfolgen oder durch Vorgabe der geforderten Eingangsgröße durch eine Produktionsdatei. In dieser ist der Mengenfluss der tatsächlichen oder geplanten Produktion über den gesamten Betrachtungszeitraum vorgegeben.

Alle zur Darstellung eines Betriebes notwendigen Module werden entsprechend den innerbetrieblichen Gegebenheiten miteinander verknüpft. Mithilfe eines übergeordneten Modulrechenprogramms kann aus den Produktionsdaten und der modularen Abbildung des Betriebes der Energiefluss innerhalb des Betriebes berechnet und dargestellt werden. Es ist möglich, die Qualität der modularen Darstellung des Betriebes an Hand vergangener Zeiträume, mit bekanntem Energiefluss und bekannten Produktionszahlen, zu überprüfen und gegebenenfalls nachzubessern. Über eine Variation der Produktionsdaten, modulinterner Parameter, wie zum Beispiel die Größe eines Wärmetauschers, und der Anzahl oder Verschaltung der Module ist der Einfluss der jeweiligen Variation auf den Energieverbrauch des Betriebes ermittelbar.

Die mit diesem Verfahren gewonnenen Ergebnisse

- stehen der Qualität von Ergebnissen konventioneller Energiekonzepte nicht nach
- sind jederzeit reproduzierbar
- sind sehr schnell an neue Gegebenheiten (z. B. neue Produktionsprognosen) anpassbar.

Bei allen Arbeiten mit dem computergestützten Verfahren erwies sich die problemlose Berücksichtigung aller über einen Betriebsablauf vorliegenden Daten als besonders vorteilhaft.

Es wurden für insgesamt 7 Betriebe die Energiekonzepte ganz oder zum Teil mit Hilfe des computergestützten Verfahrens bearbeitet. In dieser Arbeit wurden die folgenden vier Beispiele vorgestellt:

- ein Kalksandsteinwerk, als einfaches und somit als Ganzes in dieser Arbeit darstellbares Beispiel
- ein Trockner zum Trocknen von Kräutern oder Semmelbröseln, als Beispiel einer Verfahrensoptimierung
- eine Großbäckerei, bei der ein Konzept mit hoher Kapitalrücklaufzeit umgesetzt wurde und bei der alle damit verbundenen Probleme aufgezeigt werden konnten
- ein Werk zur Herstellung von Automobilen, um das Vorgehen in einem größeren und komplexeren Werk aufzuzeigen

Die im Rahmen obiger Beispiele vorgestellten Ergebnisse sowie Ergebnisse anderer Untersuchungen des Autors stützen die folgenden Beobachtungen und Schlussfolgerungen, die allerdings auf einer Datenbasis von ca. 30 Industriebetrieben aufbauen und daher vorsichtig verallgemeinert werden sollten.

Beobachtungen:

- Bei bestehenden Anlagen sind, bei den derzeitigen Energiepreisen, nur sehr selten technische Maßnahmen eines rationelleren Energieeinsatzes zu finden, deren Kapitalrückflusszeiten unter 2-3 Jahren liegen. Dies gilt jedoch nicht für organisatorische Maßnahmen wie Leerlaufvermeidung und bessere Auslastung der Anlagen
- Deutlich mehr technische Maßnahmen eines rationelleren Energieeinsatzes mit Kapitalrückflusszeiten unter 2-3 Jahren sind bei Anlagen zu finden, die neu erstellt oder grundlegend überholt werden. Allerdings neigen viele Betreiber dazu, an neue Einsparmöglichkeiten nur sehr vorsichtig heranzugehen bzw. beim Althergebrachten zu bleiben
- Maßnahmen, deren Kapitalrückflusszeiten bei über 2-3 Jahren liegen, wurden und werden in der Industrie nur selten realisiert. Daher könnten mit Kapitalrückflusszeiten von über 3, vor allem über 5 Jahren noch ganz erhebliche Einsparpotenziale realisiert werden

- Anlagen zur Energiebedarfsdeckung und auch Produktionsanlagen sind meist wesentlich länger in Betrieb als oft angenommen, meist deutlich mehr als 10, oft sogar über 20 Jahre

Schlussfolgerungen:

- Bei der Planung von Neuanlagen und der grundlegenden Überholung alter Anlagen sollte verstärkt auf einen rationelleren Energieeinsatz geachtet werden
- Hierbei kann es sich durchaus lohnen, bisher im Betrieb nicht umgesetzte Möglichkeiten zu betrachten, wie z. B. die Verbrennungsluftvorwärmung
- Wegen der langen Standzeiten der Anlagen sollte man sich bei der Entscheidungsfindung nicht nur auf die Kapitalrückflusszeiten stützen, sondern auch Kapitalwertbetrachtungen durchführen. Dies könnte in verschiedensten Fällen durchaus zu einer Entscheidung für Maßnahmen mit längeren Kapitalrückflusszeiten führen

Quellenverzeichnis

- /1/ Statistisches Bundesamt
Statistische Jahrbücher der Bundesrepublik Deutschland 1976 bis inkl. 1980
- /2/ Statistisches Bundesamt
Statistische Jahrbücher der Bundesrepublik Deutschland 1981 bis inkl. 1996
- /3/ Hellwig, T.; Thöne, E.
Omnium: Ein Verfahren zur Optimierung der Abwärmenutzung
BWK, 1994, Nr. 9
- /4/ Uhlenbruck, S.; Vogel, R.; Lucas, K.
Wärmeintegration bei Batch-Prozessen
CT 71 (1999) S. 700-704
- /5/ Linnhoff, B.; Lenz, W.
Wärmeintegration und Prozeßoptimierung
Chem.-Ing.-Tech., 1987, Nr. 11
- /6/ Schaefer, H.
Technische Kriterien und Grenzen rationeller Energienutzung
VDI Tagung: Wärmenutzungsverordnung Konzepte/Kosten/Konsequenzen, Würzburg
4.9.1990
- /7/ Roth, H.
Optimierung der Energiebereitstellung durch Wärmeintegrationsanalyse
Chemie-Technik, 1992, Nr. 10
- /8/ Voß, W.
Linientreu – Arbeitsdiagramme zur Energieeinsparung an Kesselanlagen
Energie, 1983, Nr. 3
- /9/ Kuhn, S.
Erarbeiten und Programmieren eines Algorithmus zur energetischen Verknüpfung von
Wärmequellen und Wärmesenken
Diplomarbeit am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Kraftwerkstechnik an der
Technischen Universität München
1.5.1992
- /10/ Schnell H.; Slipcevic B.
Wärmeaustauscher
Expert Verlag Ehningen bei Böblingen 1990
- /11/ VDI
VDI - Wärmeatlas
Verlag des VDI, Düsseldorf 1984

- /12/ Bressler, G.; Kuhn H.; u.A.
Betriebliche Wärmenutzungskonzepte als Instrument eines integrierten
Umweltschutzes
Zusammenfassender Endbericht
Im Auftrag des Umweltbundesamtes, München, Dezember 1993
Forschungsstelle für Energiewirtschaft
MKL Ingenieurgesellschaft
- /13/ Bressler G.; Kuhn H.; u.A.
Betriebliche Wärmenutzungskonzepte als Instrument eines integrierten
Umweltschutzes
Wärmenutzungskonzept für ein bestehendes Kalksandsteinwerk
Im Auftrag des Umweltbundesamtes, München, Dezember 1993
Forschungsstelle für Energiewirtschaft
MKL Ingenieurgesellschaft
- /14/ Kuhn H.; Leis U.
Möglichkeiten der Erdgaseinsparung im Kalksandsteinwerk Holdorf unter besonderer
Berücksichtigung der angedachten Erweiterung
MKL Ingenieurgesellschaft, München, September 1994
- /15/ Bressler, G.
Ermittlung des Energie- und Primärenergiebedarfs zur Herstellung von
Kalksandsteinen anhand einer Umfrage
Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München, 1994
- /16/ Kuhn H.; Münzer T.; Leis U.
Rationelle Energieanwendung in einer Bäckerei
Abschlußbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem Az: 03124 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt
MKL Ingenieurgesellschaft, München, Oktober 1998
- /17/ Kuhn S.; Kuhn H.; u.A.
Technikbeschreibung der Systeme zur Wärmeübertragung zwischen Stoffströmen
Studie im Rahmen des BMFT Projekts: IKARUS
MKL Ingenieurgesellschaft, München
- /18/ Bressler G.; Kuhn H.; u.A.
Betriebliche Wärmenutzungskonzepte als Instrument eines integrierten
Umweltschutzes
Wärmenutzungskonzept für eine bestehende Autolackierhalle und zentrale
Wärmeerzeugung eines Automobilwerkes
Im Auftrag des Umweltbundesamtes, München, Dezember 1993
Forschungsstelle für Energiewirtschaft
MKL Ingenieurgesellschaft