



RUHR - UNIVERSITÄT BOCHUM

**Lehrstuhl für Nukleare
und Neue Energiesysteme**
Prof. Dr.-Ing. H. Unger



**Erarbeitung von Konzepten zur Energieeinsparung
sowie zur Optimierung der Energieversorgung in
kleinen Unternehmen**

Ein Beispiel aus der Brauereibranche

**C. Remus
A. Ziolk
R. Tippkötter
M. Mohr
H. Unger**

durchgeführt im Auftrag des Landesumweltamtes
Nordrhein-Westfalen.

Anschrift:
Ruhr-Universität Bochum
Institut für Energietechnik
Lehrstuhl für Nukleare und Neue Energiesysteme
Prof. Dr.-Ing. H. Unger
44780 Bochum

April 1999

RUB E-I-234

Kurzfassung

Das Projekt „Erarbeitung von Konzepten zur Energieeinsparung sowie zur Optimierung der Energieversorgung bei kleinen Unternehmen“ wird vom Lehrstuhl für Nukleare und Neue Energiesysteme der Ruhr-Universität Bochum im Auftrag des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen bearbeitet. Das Projekt schließt dabei an vorangegangene relevante Arbeiten an. Während bislang bereits mittelständische Unternehmen der Textilverarbeitung und der Papier- und Pappeverarbeitung mit beachtlichem Erfolg untersucht wurden, wird im hier beschriebenen Projekt eine kleinere Brauerei hinsichtlich Maßnahmen zur Energieeinsparung sowie Möglichkeiten zum Einsatz moderner Energietechniken untersucht.

Basierend auf einer detaillierten Diskussion des Ist-Zustandes der betrieblichen Energieversorgung wurden für die Energieanwendungsbereiche „Prozeßwärme“, „Raumwärme“, „Brauchwarmwasser“, „Kraft“, „Beleuchtung“ sowie „Kommunikation“ Maßnahmen zur Verringerung des Energieeinsatzes untersucht. Die verschiedenen Ansätze zur Optimierung der Energieversorgung werden nicht nur unter dem Aspekt ihrer technischen Realisierbarkeit untersucht, sondern auch unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten bewertet. Dazu werden für alle Maßnahmen dynamische Amortisationszeiten bestimmt sowie mögliche Reduktionen der heutigen Schadstoffemissionen berechnet. Anschließend wird eine kostenoptimale Maßnahmenkombination zusammengestellt, die sowohl Maßnahmen mit einer dynamischen Amortisationszeit von bis zu 7 Jahren als auch das Ziel einer maximalen CO₂-Minderung berücksichtigt.

Die Untersuchungen zeigen, daß der Gesamtenergieverbrauch durch verschiedene Maßnahmen um rund 9.900 kWh/a gesenkt und dadurch z.B. eine Reduktion der CO₂-Emissionen um 45 t/a erzielt werden kann. Die Kosteneinsparung, die im wesentlichen auf eine Eigenstromerzeugung mittels einer Kraft-Wärme-Kopplungseinheit sowie auf verminderte Leistungskosten beim Strombezug durch einen optimierten Lastgang zurückzuführen sind addieren sich auf rund 60.550 DM/a, was einem Anteil von etwa 21 % der gesamten Energiekosten entspricht.

Abstract

The research project „Design of Concepts for Energy Saving and Optimization of the Energy Supply in Small Enterprises“ is carried out by the Department for Nuclear and New Energy Systems at the University of Bochum in commission of the Office of Environment of the state North-Rhine Westphalia. The study is a continuation of various relevant activities in the past. With the successful completion of two projects, each at a medium-sized enterprise (Textil Manufacturing Industry and Paper and Pasteboard Processing Industry), this project deals with the analysis of a small brewery in order to find ways for saving energy as well as possibilities for the implementation of advanced energy technologies.

Based on a detailed evaluation of the status of energy consumption for the areas „process heating“, „room heating“, „hot water preparation“, „power supply“, „lighting“ and „communication“ measures for a reduction of the actual energy consumption are discussed. The different measures are not only examined in terms of their technical feasibility but also are evaluated under economical and environmental aspects. In addition, the pay-back periods of all measures are determined as well as possible reductions of emissions. Finally, an economically optimal combination of measures which shows pay-back times of less than 7 years, combined with a maximum reduction of CO₂-emissions is considered.

It is shown, that - using different measures - the energy consumption can be reduced by up to 9.900 kWh per year, resulting in a yearly reduction of approx. 45 t of carbon dioxide emission. Savings of 60.550 DM per year which represent 21 % of the total costs for energy resulting mainly from on site co-generation of power and heat and from lower prices paid for electricity due a better load management.

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Ermittlung und Darstellung des Ist-Zustandes	3
2.1	Kurzbeschreibung des Betriebes	3
2.2	Darstellung der Produktionsabläufe und -anlagen.....	5
2.2.1	Sudhaus	6
2.2.2	Gär- und Lagerkeller.....	11
2.2.3	Flaschenkeller	13
2.2.4	Nebeneinrichtungen	16
2.3	Erfassung der energetischen Betriebsdaten und Erarbeitung einer Energiebilanz	20
2.3.1	Prozeßwärme	24
2.3.2	Raumwärme	29
2.3.3	Brauchwarmwasser	30
2.3.4	Kraft.....	30
2.3.5	Beleuchtung	34
2.3.6	Kommunikation.....	34
2.4	Abbildung des Ist-Zustandes im Bereich der Schadstoffemission.....	34
2.5	Zusammenfassende Darstellung der energetischen Situation.....	38
3	Erarbeitung von Maßnahmen zur Energieeinsparung und rationellen Energienutzung.....	39
3.1	Prozeßwärme	41
3.2	Raumwärme	50
3.3	Brauchwarmwasser	50
3.4	Kraft.....	51
3.5	Beleuchtung.....	60
3.6	Kommunikation	62
3.7	Innovative Energiesysteme, Einsatz erneuerbarer Energien	62

4 Bewertung der verschiedenen Maßnahmenbündel	63
4.1 Ranking zur Durchführung von Einzelmaßnahmen	63
4.2 Kombination verschiedener Maßnahmen mit minimalen Amortisationszeiten	66
5 Zusammenfassung	69
6 Literatur	71
A. Anhang	74
A 1. Eckdatenerhebungsbogen des betrachteten Unternehmens	74
A 2. Berechnungs- und Datenblätter der vorgeschlagenen Maßnahmen im Anwendungsbereich „Prozeßwärme“	86
A 3. Berechnungs- und Datenblätter der vorgeschlagenen Maßnahmen im Anwendungsbereich „Kraft“	94
A 4. Berechnungs- und Datenblätter der vorgeschlagenen Maßnahmen im Anwendungsbereich „Beleuchtung“	103

Abbildungsverzeichnis

Abb.-Nr.	Titel der Abbildung	Seite
2.1	Grundfließbild der Produktionsabläufe einer Brauerei	5
2.2	Grundfließbild des Sudhauses	7
2.3	Grundfließbild des Gär- und Lagerkellers.....	12
2.4	Grundfließbild des Flaschenkellers	14
2.5	Grundfließbild der Nebeneinrichtungen.....	17
2.6	Struktur des Endenergeträgereinsatzes der Brauerei in Höhe von rund 3,44 Mio. kWh im Jahr 1998.....	21
2.7	Energieflußdiagramm des untersuchten Betriebes für das Betriebsjahr 1998.....	23
2.8	Verteilung der vorgelagerten und betrieblichen Schadstoff-emissionen für die verschiedenen Luftschadstoffe.....	36
2.9	Prozentuale Verteilung der Schadstoffemissionen auf die verwendeten Endenergeträger	37
3.1	Wirkungsgradlinie eines Elektromotors	52
3.2	Wirkungsgradkennlinie eines Elektromotors bei Stern- und Dreieckschaltung	54
3.3	Gemessene Spitzenleistung des Strombezuges in kW je Kalendermonat.....	59

Tabellenverzeichnis

Tab.-Nr.	Titel der Tabelle	Seite
2.1	Ergebnisse der Schadstoffberechnungen des Betriebes	35
3.1.	Übersicht über die Maßnahmen zur Optimierung der Prozeßwärmeanwendung	49
3.2.	Übersicht über exemplarische Motorersatzmaßnahmen	53
3.3.	Zusammenfassung weiterer Energie- bzw. Kostenpotentiale im Bereich "Kraft"	60
4.1	Prioritätenliste der Einzelmaßnahmen in der Reihenfolge ihrer dynamischen Amortisationszeiten (Teil I)	64
4.2	Prioritätenliste der Einzelmaßnahmen in der Reihenfolge ihrer dynamischen Amortisationszeiten (Teil II)	65
4.3	Ranking der umsetzbaren Maßnahmen in der Reihenfolge ihrer dynamischen Amortisationszeiten	68
A.1	Daten- und Berechnungsunterlagen zur Energieeinsparmaßnahme: „Gas-Otto-BHKW, Variante I“	87
A.2	Daten- und Berechnungsunterlagen zur Energieeinsparmaßnahme: „Gas-Otto-BHKW, Variante II“	88
A.3	Daten- und Berechnungsunterlagen zur Energieeinsparmaßnahme: „Gas-Otto-BHKW, Variante III“	89
A.4	Daten- und Berechnungsunterlagen zur Energieeinsparmaßnahme: „Gas-Otto-BHKW, Variante IV“	90
A.5	Daten- und Berechnungsunterlagen zur Energieeinsparmaßnahme: „Gas-Otto-BHKW, Variante V“	91
A.6	Daten- und Berechnungsunterlagen zur Energieeinsparmaßnahme: „Gas-Otto-BHKW, Variante VI“	92
A.7	Daten- und Berechnungsunterlagen zur Energieeinsparmaßnahme: „Gas-Otto-BHKW, Variante VII“	93

A.8	Daten- und Berechnungsunterlagen zur Energieeinsparmaßnahme: „Einsatz eines Lastmanagementsystems“	95
A.9	Daten- und Berechnungsunterlagen zur Energieeinsparmaßnahme: „Motoreinsatz (2,2 kW => 1,1 kW Neumotor)“	96
A.10	Daten- und Berechnungsunterlagen zur Energieeinsparmaßnahme: „Motoreinsatz (2,2 kW => 1,1 kW Gebrauchtmotor)“	97
A.11	Daten- und Berechnungsunterlagen zur Energieeinsparmaßnahme: „Motoreinsatz (15 kW => 7,5 kW Neumotor)“	98
A.12	Daten- und Berechnungsunterlagen zur Energieeinsparmaßnahme: „Motoreinsatz (15 kW => 7,5 kW Gebrauchtmotor)“	99
A.13	Daten- und Berechnungsunterlagen zur Energieeinsparmaßnahme: „Einsatz Frequenzumformer (2,2 kW Motor)“	100
A.14	Daten- und Berechnungsunterlagen zur Energieeinsparmaßnahme: „Einsatz Frequenzumformer (7,5 kW Motor)“	101
A.15	Daten- und Berechnungsunterlagen zur Energieeinsparmaßnahme: „Einsatz Frequenzumformer (15 kW Motor)“	102
A.16	Daten- und Berechnungsunterlagen zur Energieeinsparmaßnahme: „Einsatz eines Lichtsteuerungssystems“	104

1 Einleitung

Das Projekt "Erarbeitung von Konzepten zur Energieeinsparung sowie zur Optimierung der Energieversorgung bei kleinen Unternehmen" wird vom Lehrstuhl für Nukleare und Neue Energiesysteme der Ruhr-Universität Bochum im Auftrag des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen bearbeitet. Das hier beschriebene Forschungsprojekt schließt dabei an vorangegangene Arbeiten an (vgl. hierzu [1, 5, 6]). Insbesondere der Aufbau und die Gliederung der Projektarbeiten orientieren sich eng an den bereits durchgeführten Untersuchungen, um die Konsistenz der Arbeiten zu wahren und die erprobte und bewährte Vorgehensweise zu nutzen. Während in der Vergangenheit zwei mittelständische Unternehmen aus den Industriebranchen der Textilverarbeitung (vgl. [5]) und der Papier- und Pappeverarbeitung (vgl. [6]) mit beachtlichem Erfolg untersucht wurden, ist im hier dokumentierten Projekt eine kleinere Brauerei Gegenstand der Untersuchungen.

Im zweiten Kapitel werden zunächst der untersuchte Betrieb vorgestellt, die wichtigsten Eckdaten der Energieversorgung diskutiert, der Produktionsprozeß detailliert erläutert sowie graphisch in Form verschiedener Grundfließbilder aufbereitet. Durch Betriebsbegehungen wurden die notwendigen Informationen zur Erarbeitung einer betrieblichen Energiebilanz zusammengetragen, überprüft und aufbereitet. Für das zugrunde gelegte Betriebsjahr 1998 wurde somit eine detaillierte Energie- und Leistungsbilanz in den Anwendungsbereichen „Prozeßwärme“, „Raumwärme“, „Kraft“, „Beleuchtung“ und „Kommunikation“ erstellt. Die erfaßten und berechneten Daten werden tabellarisch und in Form eines Energieflußdiagrammes aufbereitet. Anhand des ermittelten Energieeinsatzes wird ferner eine Schadstoffbilanz hergeleitet, wobei neben den Emissionen, die unmittelbar durch den betrieblichen Einsatz der Energieträger entstehen, auch vorgelagerte Emissionen bei der Gewinnung, der Aufbereitung und dem Transport der Energie Berücksichtigung finden.

Die Erarbeitung von Maßnahmen zur Energieeinsparung bzw. zur Optimierung der derzeitigen Energieversorgung ist Gegenstand des dritten Kapitels. Basierend auf einer Schwachstellenanalyse der derzeitigen Versorgung werden in den verschiedenen Anwendungsbereichen konkrete Maßnahmen entwickelt sowie energetisch, ökonomisch und ökologisch bewertet. Die ermittelten Nutzenergieeinsparungen einer vorgeschlagenen Optimierungsmaßnahme werden zur Bewertung der Energiebilanz des Unternehmens jeweils auf mögliche Endenergieeinsparungen umgerechnet. Die wirtschaftlichen Aspekte werden durch die dynamische Amortisationszeit der erforderlichen Investitionen abgebildet, während die ökologischen Aspekte vor allem durch die zu realisierenden Emissionsminderungen beschrieben werden. Die detaillierten Vorschläge, d.h. die durchgeführten Auslegungsrechnungen und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, werden ausführlich erläutert und in einem Daten- und Berechnungsblatt übersichtlich zusammengestellt.

Im vierten Kapitel werden zunächst die verschiedenen Einzelmaßnahmen untereinander bewertet und ein darauf aufbauend ein Maßnahmenranking erstellt, wobei die dynamische Amortisationszeit als Einstufungskriterium herangezogen wurde. Bei der Erstellung der Prio-

ritätenliste, die auf einer Verknüpfung mehrerer Einzelmaßnahmen basiert, wird auch die gegenseitige Einflußnahme der Einzelansätze untereinander berücksichtigt.

Das fünfte Kapitel faßt die wesentlichen Ergebnisse dieses Berichtes zusammen.

2 Ermittlung und Darstellung des Ist-Zustandes

2.1 Kurzbeschreibung des Betriebes

Die im Rahmen der nachfolgend beschriebenen Projektarbeiten untersuchte Brauerei stellt im konventionellen Brauverfahren, dessen Grundlage letztlich das deutsche Reinheitsgebot von 1516 ist, zwei verschiedene Biersorten („Pils“ und „Dunkles“) her. Insgesamt werden so jährlich etwa 70.000 hl Verkaufsbier gebraut. Die Sorte „Dunkles“ wird dabei als „Spezialität“ bezeichnet und hat einen Produktionsanteil von 7 % am Gesamtausstoß. Insgesamt sind im hier beschriebenen Unternehmen 47 Mitarbeiter beschäftigt, die in der Regel im zweischichtigen Betrieb arbeiten. Die im folgenden beschriebenen Produktionsabläufe und Betriebsdaten wurden zunächst mittels eines Eckdatenbogens erhoben und im Rahmen von Betriebsbegehungen spezifiziert bzw. erweitert. Der Eckdatenbogen des Unternehmens ist im Anhang beigefügt.

Grundsätzlich gliedert sich der Brauprozess innerhalb des Unternehmens in die drei Teilabschnitte „Sudhaus“, „Gär- und Lagerkeller“ und „Flaschenkeller“. Die dem eigentlichen Brauprozess vorgelagerte Malzbereitung wird im Unternehmen seit 1968 nicht mehr selbst durchgeführt, vielmehr wird fertiges Braumalz von verschiedenen Handelsmälzereien über langfristige Verträge bezogen. Das angelieferte Rohmalz wird bis zur Überführung in den Brauprozess in den Vorratsbehältern gelagert. Zur Vorbereitung des Maischens, also der Lösung der Malzbestandteile und der nachfolgenden enzymatischen Umwandlung der gelösten Bestandteile, wird das Malz über eine Trockenschrotung mechanisch zerkleinert. Das benötigte Brauwasser wird über betriebseigene Brunnen gefördert und den Anforderungen entsprechend aufbereitet. Im Sudhaus wird das erwärmte Brauwasser mit dem geschroteten Malz in der Maischepfanne zusammengeführt.

Die Maischegewinnung erfolgt anschließend im sog. Infusionsmaischverfahren. Um die Maische nach Abschluß des Maischprozesses von den festen Malzbestandteilen zu trennen, wird ein sog. Läuterbottich eingesetzt. Nach dem Abläutern beginnt dann die atmosphärische Niederdruckkochung in einer zweizonenbeheizten Würzepfanne. Die entstehenden Brüden (Kochschwaden) werden über einen Pfannendunstkondensator abgezogen und kondensiert, wobei die entstehende Kondensationswärme der Vorwärmung des Brauwassers dient.

Das Anstellen der heißen Würze auf die zur Einleitung der Hauptgärung (Hefe- und Sauerstoffzugabe im Anstelltank) gewünschte Temperatur von 7 °C erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird die Würze im ersten Teil eines Plattenkühlers mit kaltem Brauwasser auf etwa 20 °C gekühlt, wobei dieses vorgewärmt und als Brauwasser für nachfolgende Sude einem Warmwasserspeicher zugeführt wird. Die anschließende vollständige Abkühlung der Würze auf die erforderliche Anstelltemperatur erfolgt mittels Eiswasser, das durch eine der beiden zentralen Kompressionskälteanlagen bereitgestellt wird. Die kalte Würze verläßt an dieser Stelle das Sudhaus und gelangt in die nachfolgenden Produktionsstufen im Gärkeller, der die einzelnen Gärtanks enthält; dort erfolgt die Hauptgärung der Würze, die zwischen 5-7 Tagen dauert. Anschließend wird das sog. Jungbier in die Lagertanks umgefüllt, wo eine etwa

zehntägige Nachgärung und eine Lagerungs- und Reifezeit von rund 3 Wochen eingehalten werden. Im Anschluß an diese Ruhephase wird das Bier unmittelbar vor der Abfüllung filtriert und in die Drucktanks umgefüllt. Von hier aus gelangt es in die Füller der Keg- und Flaschenfüllanlagen, die für die Abfüllung des Bieres in die verschiedenen Transportgebilde sorgen. Den Abschluß des Produktionsablaufes bildet der Versand des Produktes, der zu 75-80 % über den Getränkegroßhandel sowie durch einen betriebseigenen Fuhrpark erfolgt.

Der Endenergiebedarf des Unternehmens wird 1998 voraussichtlich rund 3,44 Mio. kWh betragen. Davon entfallen 74 % auf die Dampferzeugung, wofür rund 1,30 Mio. kWh Erdgas und etwa 1,25 Mio. kWh Heizöl EL eingesetzt werden. Der Strombezug liegt 1998 bei ca. 0,89 Mio. kWh. Die erforderliche Prozeßwärme wird über einen Dampfkessel mit einer thermischen Leistung von 3.600 kW bereitgestellt. Der Raumwärmebedarf wird über Dampfwärmetauscher gedeckt. Die Stromversorgung erfolgt durch den Bezug elektrischer Energie vom lokalen Energieversorgungsunternehmen, wobei die bereitgestellte Energie über einen zentralen Transformator von der 10 kV-Spannungsebene auf das betriebliche Spannungsniveau von 400 V umgespannt wird.

Das Unternehmen arbeitet überwiegend im Zweischichtbetrieb. Produktionsbedingt ist einerseits ein sehr ausgeprägter Wochengang (Sudtage, Filtration, Flaschenkellerbetrieb) und andererseits saison- bzw. absatzbedingt ein deutlicher Jahrgang (Sommer- und Winterbetrieb) zu erkennen. Grundlage und zeitlicher Gliederungsparameter des Wochen- bzw. Jahrganges ist dabei der Sudhausbetrieb. Sowohl die vorgelagerten als auch die nachfolgenden Produktionsschritte sind dem Sudhaus angepaßt. In den Sommermonaten werden im Unternehmen an vier Tagen pro Woche jeweils vier Sude gekocht sowie an 2,5 Tagen im Flaschenkeller Flaschen und an zwei Fässer abgefüllt. Hierzu ist an zwei Tagen pro Woche eine Filtration erforderlich. Das im Flaschenkeller abgefüllte Bier ist dabei etwa sechs Wochen zuvor im Sudhaus gebraut worden. Im Winterbetrieb hingegen werden nur etwa zehn Sude pro Woche gekocht und die entsprechenden Arbeitsschritte zur Vor- und Nachbereitung dabei analog reduziert.

Als Produktionsreststoffe fallen im wesentlichen Abwasser und die sog. Treber an. Als Treber werden die festen Malzbestandteile bezeichnet, die nach dem Maischen im Läuterbottich von der Würze getrennt werden. Diese werden mit Hilfe von Druckluft in das Trebersilo gefördert und kostendeckend an Landwirte abgegeben, welche die Treberrückstände als Futtermittel nutzen. Das Abwasser wird über ein 150 m³ großes Vorklärbecken gesammelt und nachfolgend dem kommunalen Abwassernetz zugeführt.

2.2 Darstellung der Produktionsabläufe und -anlagen

Zur Verdeutlichung der nachfolgenden Energiebedarfsanalysen und der Erarbeitung möglicher Ansätze zur Optimierung der bestehenden Energieversorgung bildet die genaue Kenntnis des Produktionsablaufes eine wesentliche Grundlage. Anhand eines Grundfließbildes nach DIN 28004 Teil 1 (vgl. Abbildung 2.1) werden daher zunächst die wesentlichen Produktionsabschnitte erläutert sowie die dazugehörigen Energie- und Stoffströme dargestellt. Dabei sind die jeweiligen Produktionseinheiten als entsprechend beschriftete Rechtecke zu erkennen. Die Verbindungslinien zwischen den Produktionsschritten symbolisieren den Stofffluß, dessen Richtung durch entsprechende Pfeile angezeigt wird. Große Pfeilsymbole zu Beginn und am Ende der Linien geben dabei ein- bzw. austretende Stoffströme an. Abbildung 2.1 zeigt das Grundfließbild des Brauprozesses im untersuchten Betrieb.

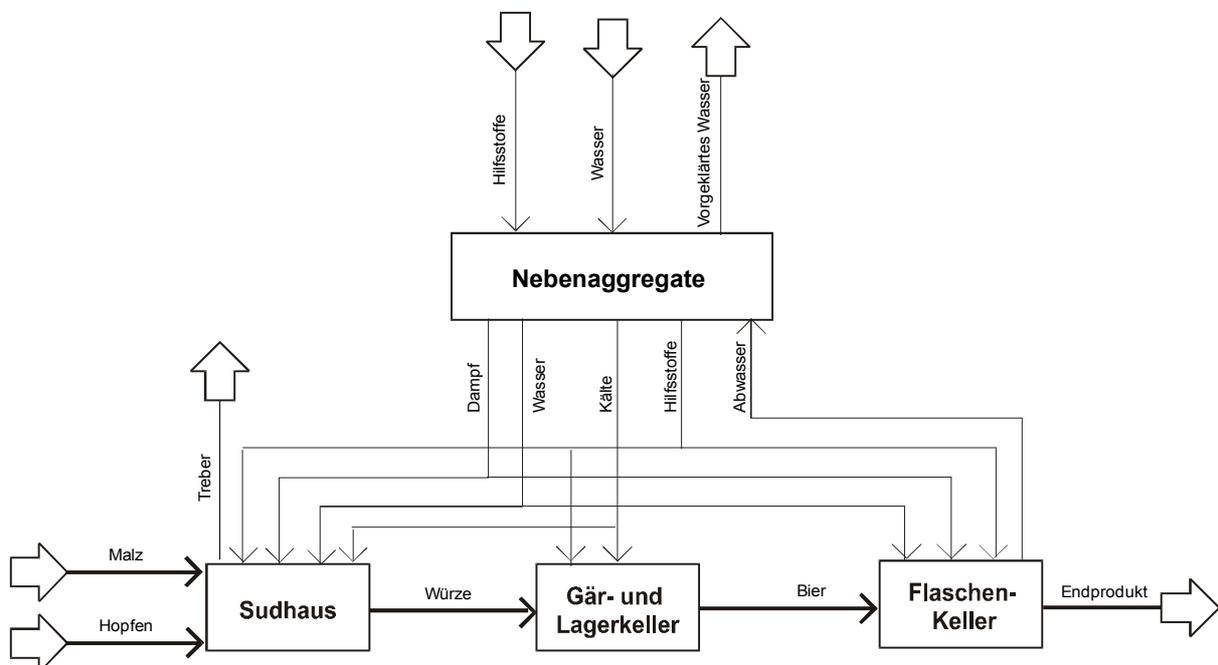


Abbildung 2.1 Grundfließbild der Produktionsabläufe einer Brauerei

Grundlage des Brauprozesses ist die Gewinnung der Würze im Sudhaus. Entsprechend des deutschen Reinheitsgebotes von 1516 darf Bier nur aus den Zutaten Malz, Hopfen, Hefe und Wasser hergestellt werden. Nahezu alle Zutaten werden im Sudhaus zur Würze verarbeitet. Während der Hopfen und das Gerstenmalz - das Malz wird lediglich noch frisch geschrotet - braufertig angeliefert werden, wird das durch eigene Brunnen gewonnene Brauwasser zunächst in der Wasseraufbereitung behandelt, um die gewünschte Wasserqualität zu erreichen. Im Sudhaus fällt ferner auch der einzig nennenswerte Produktionsreststoff, der sog. Treber, an. Er wird vom Unternehmen an umliegende Landwirte als Tierfutter kostendeckend vermarktet. Das Sudhaus ist durch einen erheblichen Wärmebedarf gekennzeichnet, der durch den Kessel in Form von Heizdampf bereitgestellt wird. Zur Dampferzeugung setzt das Unternehmen die Brennstoffe „Erdgas“ und „Heizöl“ ein. Der Bedarf an Antriebsenergie wird

im Unternehmen ausschließlich durch Elektromotoren gedeckt, die mit dem vollständig vom lokalen Energieversorgungsunternehmen bezogenen Strom versorgt werden.

Die im Sudhaus gewonnene Würze gelangt anschließend in den Gär- und Reifeprozess, wobei die Stammwürze (Eiweiß, Malzzucker) zu Alkohol und Kohlensäure vergoren wird. Die Gärung der Würze erfolgt in verschiedenen Abschnitten, wobei lediglich die Temperaturen in den Gärbehältern variieren. Im Verlaufe der Hauptgärung müssen die Gärbehälter auf eine konstante Temperatur gekühlt werden. Die erforderliche Kälte wird durch die zwei Kälteanlagen auf der Basis von insgesamt vier Kompressionskälteanlagen bereitgestellt.

Nach Abschluß der Hauptgärung gelangt das Jungbier in die sog. Reifetanks. Hier wird das Bier auf etwa 8 °C gekühlt und somit die Nachgärung eingeleitet, welche über einen Zeitraum von etwa zehn Tagen erfolgt. Anschließend lagert das Jungbier bei 0 °C etwa drei Wochen in den Reifetanks, bevor es in der Filtration und Abfüllung weiterverarbeitet wird.

Die anschließende Reinigung des Produktes erfolgt durch Filtration des Bieres, wobei vor allem Schweb- und Begleitstoffe abgeschieden werden. Die Filtration erfolgt zweistufig und dient dem Ziel, Hefe- und Begleitstoffe aus dem Bier zu filtern, um dieses haltbar zu machen.

Den Abschluß der Produktion stellt das Abfüllen des Bieres in die verschiedenen Transportgebinde dar. Hierzu werden diese zunächst in der Faß- und Flaschenreinigung gesäubert und anschließend auf verschiedene „Füller“ verteilt. Diese füllen das Bier unter einem CO₂-Überdruck ab.

Eine sehr übersichtliche und nachvollziehbare Darstellung des gesamten Produktionsablaufes erlaubt eine Unterscheidung der vier Produktionsabschnitte

- Sudhaus,
- Gär- und Lagerkeller,
- Flaschenkeller und
- Nebeneinrichtungen.

Diese einzelnen Bearbeitungsschritte werden daher nachfolgend detailliert betrachtet und in einzelne Arbeitsschritte gegliedert. Die jeweiligen Teilbereiche werden ferner durch ein entsprechendes Verfahrensbild dargestellt (vgl. Abbildungen 2.2 -2.5).

2.2.1 Sudhaus

Das Sudhaus bildet nicht nur den wichtigsten Prozessschritt innerhalb der Brauerei, da die hier erzielte Qualität der Maische bzw. Würze auch maßgeblich die Qualität des Produktes

bestimmt, sondern ist gleichzeitig der Energiebedarfsschwerpunkt einer Brauerei [1]. Die prinzipiellen Verfahrens- und Arbeitsschritte im Sudhaus zeigt Abbildung 2.2.

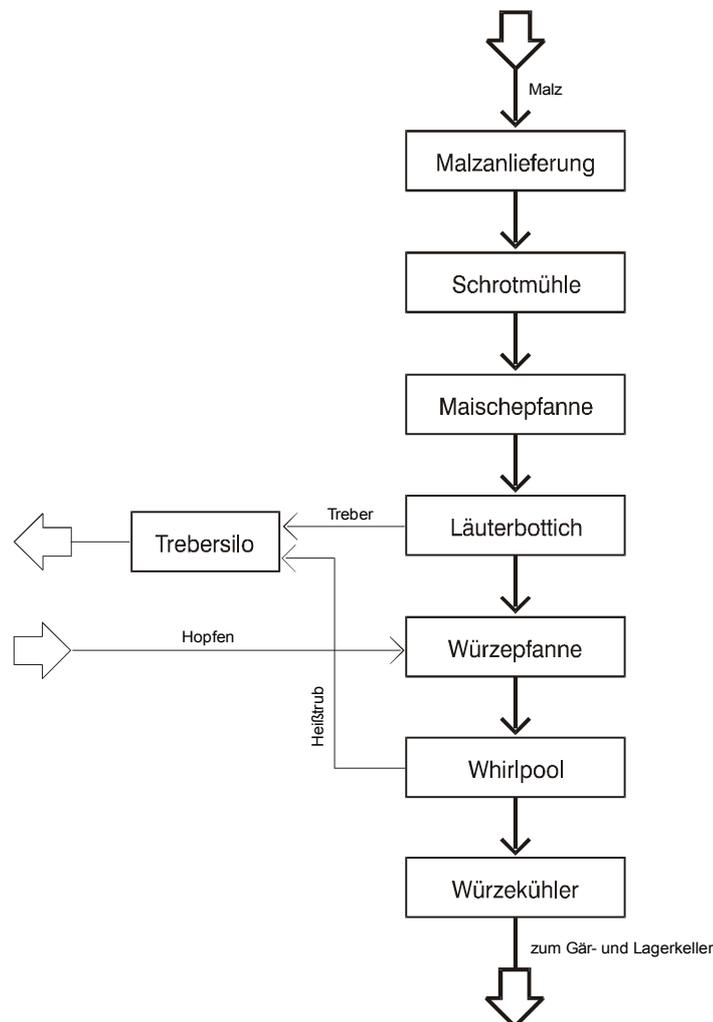


Abbildung 2.2 Grundfließbild des Sudhauses

Der Produktionsprozess im Sudhaus beginnt mit der Annahme und der Lagerung des Rohstoffs „Malz“ in den fünf Silobehältern des Unternehmens. Gekeimte Gerste wird dabei als Malz bezeichnet, wobei die Keimung eine Aktivierung der für den Maischprozess notwendigen Enzyme der Gerste bewirkt und ein entscheidendes Qualitätsmerkmal darstellt. Das Mälzen der Braugerste, d.h. das kontrollierte Keimen, wird von der untersuchten Brauerei nicht selbst betrieben, sondern von verschiedenen Mälzereien braufertig angekauft. Zur Sicherung der Malzqualitäten bestehen zwischen dem Unternehmen und verschiedenen Mälzereien langfristige und enge vertragliche Bindungen. Das angelieferte Malz wird vom Annahmesilo zur Zwischenlagerung pneumatisch in eines der fünf Malzsilos befördert. Die gesamte Lagerkapazität beträgt rund 100 t. Die Bevorratung des Malzes in verschiedenen Silos dient dem Zweck, unterschiedliche Malzlieferungen zu mischen und somit eine möglichst gleichbleibende Malzqualität zu gewährleisten. Den Behältern selbst kommt dabei die wichti-

ge Aufgabe zu, das Malz vor Umwelteinflüssen wie Schmutz oder aber Feuchtigkeit zu schützen.

Schrotmühle

Als Schroten wird die mechanische Zerkleinerung des Malzes in der Schrotmühle bezeichnet. Es dient dem Zweck, das Braumalz zu zerkleinern, um die chemischen und enzymatischen Umwandlungsprozesse besser ablaufen zu lassen und eine optimierte Ausbeute der gewünschten Inhaltsstoffe zu erreichen. Grundsätzlich lassen sich die Malzbestandteile im Brauwasser um so leichter lösen, je feiner das Malz geschrotet wird. Der Mehlkörper des Malzkornes besteht dabei überwiegend aus Stärke, sonstigen Kohlenhydraten und Eiweißstoffen, die möglichst vollständig gelöst und von den entsprechenden Enzymen umgewandelt werden sollen.

Die Größe des Malzschrotes hängt vom jeweiligen Maischverfahren ab. Bei der Anwendung intensiver Maischverfahren, bei denen die Würze bis zum Siedepunkt erhitzt und für einen bestimmten Zeitraum gekocht wird (Dekoktionsverfahren) kann grober Schrot eingesetzt werden, wohingegen bei Maischverfahren, die auf einen physikalischen Aufschluß des Malzes verzichten (die Maische wird nicht gekocht), das Malz feiner gemahlen wird, um den vollständigen biologischen Abbau der Malzbestandteile durch die Enzyme zu ermöglichen [2-4].

Allerdings sprechen auch bei nicht dekoktiven Maischverfahren verschiedene Gesichtspunkte gegen eine sehr feine Schrotung des Malzes. So dienen die Spelzen des Malzes beim Abläutern im Läuterbottich als natürliche Filterschicht. Bei einer sehr feinen Mahlung verringert sich die Durchflußgeschwindigkeit, wodurch sich beim sog. Abläutern der Abfluß der Würze verzögern kann. Neben der wasserunlöslichen Zellulose enthalten die Spelzen zudem eine Reihe löslicher Stoffe, die bei einer feinen Mahlung stärker ausgelaugt werden und die Farbe und den Geschmack des Bieres nachteilig beeinflussen können.

Im betrachteten Unternehmen wird eine Schrotmühle eingesetzt. Sie stammt aus dem Jahre 1953, arbeitet allerdings einwandfrei und wird regelmäßig gewartet. Der Antriebsmotor besitzt eine Leistung von rund 7 kW, ihre Leistung beträgt rund 1.500 kg/h. Zum Einmaischn benötigt das Unternehmen 1.800 kg Malz pro Sud, so daß die Schrotmühle vor dem Einmaischn etwa 70 min arbeitet. Der Betriebsrhythmus der Mühle wird durch den Sudhausbetrieb bestimmt.

Die Schrotung des Malzes erfolgt unmittelbar vor dem Einmaischn im Sudhaus. Das Malz wird über eine Dosierstation den Vorratsbehältern entnommen und pneumatisch in den Vorlagebehälter der Mühle gefördert. Von dort gelangt es unter dem Einfluß der Schwerkraft in die Mühle und fällt nach dem Mahlprozeß erneut in einen Vorratsbehälter. Dieser befindet sich direkt oberhalb des Maischegefäßes und von dort kann das Malz über eine Klappe direkt in die Maischepfanne eingebracht werden.

Maischen

Das Maischen beginnt mit dem sog. Einmaischen, d.h. dem Einbringen von Braumalz (Schüttung) und warmem Brauchwasser (Guß) in die Maischepfanne. Im hier beschriebenen Unternehmen wird bei einer Temperatur von 60 °C, die durch eine Mischung aus warmen und kaltem Brauwasser erreicht wird, eingemaischt. Je nach Maischverfahren variiert das Verhältnis von Schüttung zu Guß sowie die Temperatur des Gusses, der ferner in einen Haupt- und einen Nachguß unterteilt wird. Zunächst wird nur die zur Lösung der Malzbestandteile und die zur Durchführung der chemisch-biologischen Umsetzung benötigte Wassermenge zugesetzt. Die gewonnene Extraktlösung wird als Vorderwürze bezeichnet. Im sog. Nachguß werden die Extraktreste, die noch im Treber enthalten sind, ausgewaschen [2-4].

Beim Maischen werden die Schrot- bzw. Malzbestandteile in Wasser gelöst. Der Maischprozeß wird dabei so gesteuert, daß die zu gewinnende Würze eine bestimmte Zusammensetzung aus Kohlenhydraten, Eiweißabbauprodukten sowie weiteren organischen und anorganischen Substanzen hat. Im hier untersuchten Betrieb wird das sog. Infusionsmaischverfahren angewendet, wobei im Gegensatz zu den Dekoktionsverfahren die Maische nicht gekocht, sondern das Aufschließen der Bestandteile des Malzschrotes ausschließlich auf enzymatischem Wege erreicht wird. Im weiteren Verlauf des Maischprozesses wird die Maische über verschiedene Temperaturstufen bis zur Abmischtemperatur von 78 °C erhitzt. Die Einhaltung sog. Eiweiß- und Verzuckerungspausen auf bestimmten Temperaturstufen ist für die optimale enzymatische Aufschließung der Malzbestandteile notwendig, da die unterschiedlichen Enzyme ihr jeweiliges Wirkungsoptimum bei unterschiedlichen Temperaturen erreichen. Die Dauer der sog. Rasten bzw. das jeweilige Temperaturniveau ist von der Malz- und der Bierart abhängig. Der gesamte Maischvorgang dauert etwa 1,5 Stunden.

Der Vorteil des Infusionsverfahrens gegenüber den Dekoktionsverfahren liegt in dem deutlich niedrigeren Wärmebedarf, da hier auf die Kochphase verzichtet und die Maische i.d.R. eine Temperatur von 80 °C nicht überschreitet. Im Gegensatz dazu ist jedoch der Wasserbedarf höher als bei den Dekoktionsverfahren [2, 3].

Läuterbottich

Bei der Würzegewinnung werden die beim Maischen in lösliche Form überführten Stoffe von den unlöslichen getrennt. Dabei wird zunächst die Vorderwürze abgeläutert, d.h. die gewonnene Würze gefiltert und abgezogen. Die noch in den Trebern verbliebene Restwürze wird mit heißem Brauwasser ausgewaschen (Nachguß). Der beschriebene Trennvorgang kann mittels verschiedener Verfahren erzielt werden.

Im untersuchten Betrieb wird zum Abläutern ein Läuterbottich, ein rundes Gefäß, welches mit einem Senkboden und einem Rührwerk versehen ist, eingesetzt. Der Senkboden besteht aus flachen, dicht eingepaßten Edelstahlsieben mit dünnen eingefräßten Spalten und steht

auf zentimeterhohen Füßen, so daß die Würze durch die Spalten ablaufen kann. Zu Beginn des Abläuterungsvorgangs wird zunächst der Bereich zwischen dem Senk- und Läuterbottichboden mit heißem Wasser gefüllt, um die dort befindliche Luft zu verdrängen. Das richtige Einlagern der Maische ist Voraussetzung für einen optimalen Abläutervorgang. Um ein Entmischen der Maische zu verhindern, wird die Maische unter ständigem Gang eines Rührwerkes in den Läuterbottich gepumpt. Während des Abmaischens bildet sich eine Filterschicht aus Spelzen, die sich aufgrund ihres höheren spezifischen Gewichtes absetzen. Die weiteren Schichten werden aus Spelzentrümmern sowie den leichtesten Fragmenten der Maische (feine Hülsensplitter, ausgeschiedene Eiweiße u.ä.) gebildet. Die Würze, in der die restlichen Substanzen gelöst sind, befindet sich über dem Treberkuchen.

Da die im Läuterbottich verbliebenen Treberteilechen noch Restwürze enthalten, wird diese durch drei „Nachgüsse“ mit 78 °C warmem Wasser ausgewaschen (Anschwänzen bzw. Aussüßen der Treber). Die verbliebenen Treber (Spelzen, sonstige Rückstände) werden anschließend zunächst über eine Treberschnecke und dann mit Hilfe von Druckluft in das Trebersilo befördert.

Würzekochung

Die Würze wird im nächsten Bearbeitungsschritt in den Würzekocher, die sog. Würzepfanne gepumpt, in der die Würze gekocht und gehopft wird. Ziel dieses Arbeitsschrittes ist

- das Einstellen der gewünschten Würzekonzentration durch Verdampfung des überschüssigen Brauwassers,
- die Zerstörung der Malzenzyme bzw. Fixierung der Würzezusammensetzung,
- die Sterilisierung der Würze,
- eine weitgehende Ausscheidung koagulierbarer Eiweißsubstanzen sowie
- die Lösung der Hopfenwertbestandteile in der Würze (vor allem der Bitterstoffe).

Da durch die Nachgüsse beim Abläutern die Würze stark verdünnt wird, ist die Verdampfung des überschüssigen Wassers und die Einstellung der gewünschten Würzekonzentration ein wesentlicher Aspekt der Würzekochung. Im untersuchten Betrieb wird die Würze zusammen mit dem Hopfen bei 100 °C (atmosphärische Kochung) für 75 Minuten gekocht. Dabei werden pro Stunde in etwa 8-10 % der gewünschten Ausschlagmenge verdampft. Mögliche höhere Verdampfungsziffern werden nicht gefahren, da sich notwendige Umsetzungsprozesse in der Würze verschlechtern würden [3, 4]. Die Hopfenzugabe während des Kochprozesses dient dem Zusatz von Bitterstoffen, um bestimmten Biersorten das typische Hopfenaroma zu verleihen, die Eiweißkoagulation beim Kochprozeß zu fördern sowie das Bier zu färben und zu konservieren.

Um die in den Brüden enthaltene Wärme zu nutzen, wird im untersuchten Unternehmen ein sog. Pfannendunstkondensator (PfaDuKo) eingesetzt. Hierbei wird der entstehende Dampf kondensiert und die Kondensationswärme über einen Wärmeübertrager an das kalte Brauwasser überführt. Pro Sud können somit ca. 6.500 l kaltes Brunnenwasser von etwa 11 °C auf 80 °C erwärmt, welches dann in einen Warmwasserspeicher zugeführt wird.

Whirlpool und Würzekühlung

Nach Beendigung des Kochvorganges, d.h. beim Erreichen eines Stammwürzegehaltes von ca. 12 %, wird die Würze „ausgeschlagen“, d.h. sie wird zur Abkühlung und weiteren Behandlung in über einen sog. Whirlpool in die Würzekühlanlage gepumpt. Dabei wird die Würze durch einen tangentialen Einfluß in den zylindrischen Behälter in eine rotierende Strömung versetzt, wodurch sich Hopfen- und Eiweißrückstände, der sog. Heißtrub, in der Mitte des Behälterbodens absetzen. Die Würze wird abgezogen und der Heißtrub in das Trebersilo gegeben. Danach wird die Würze auf die Anstelltemperatur heruntergekühlt. Je nach Biersorte variiert diese Temperatur. Im untersuchten Betrieb wird bei einer Anstelltemperatur von 7 °C untergäriges Bier gebraut.

Das Kühlen der Würze erfolgt in zwei Stufen; zunächst wird die Würze vom Whirlpool über einen Wärmeübertrager geführt, wobei sie sich unter Wärmeabgabe an das eingesetzte kalte Brauwasser abkühlt. Das so vorgewärmte Brauwasser wird wie die Abwärme des Pfannendunstkondensators bis zur weiteren Verwendung in einen Warmwasserspeicher gefördert. Im zweiten Schritt wird die zur weiteren Kühlung der Würze auf die gewünschte Anstelltemperatur von 7 °C benötigte Kälteleistung durch eine Kälteanlage bereitgestellt.

Das untersuchte Unternehmen setzt zwei Kälteanlagen ein. Eine Anlage dient dabei der Kältebereitstellung im Sudhaus zum Kühlen der Würze auf die Anstelltemperatur, die andere wird zur Einhaltung einer geforderten Gär- bzw. Lagertemperatur des Bieres im Gär- und Lagerkeller benötigt.

2.2.2 Gär- und Lagerkeller

Die kalte Würze gelangt vom Plattenkühler in den sog. Anstelltank. Während des Pumpvorgangs wird der Würze bereits Hefe und Sauerstoff zur Umwandlung des gelösten Malzzucker in Alkohol und Kohlensäure zugesetzt. Die vorhandenen Gärtanks fassen jeweils vier Sude, so daß erst nach dem vierten Sud und der Aufnahme des zugesetzten Sauerstoffs durch die Hefe im letzten Sud die eigentliche Gärung beginnt. Den prinzipiellen Produktionsablauf im Gär- und Lagerkeller skizziert Abbildung 2.3.

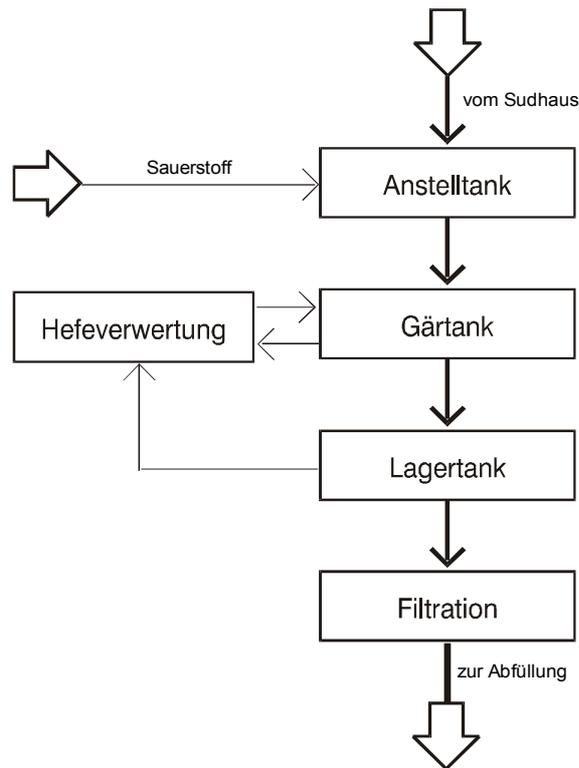


Abbildung 2.3 Grundfließbild des Gär- und Lagerkellers

Grundsätzlich wird zwischen untergäriger bzw. obergäriger Hefe unterschieden. Die untergärige setzt sich unten am Bottichboden ab, die obergärige hingegen schwimmt oben auf dem Bier. Des weiteren erreicht die untergärige Hefe ihr Wirkungsoptimum in einem Temperaturbereich von 6-10 °C, die obergärige bei 15-20 °C. Die unterschiedlichen Temperaturen beeinflussen nachhaltig Geschmack und Aroma des Bieres.

Hauptgärung

Im untersuchten Unternehmen wird das Bier untergärig in stehenden, geschlossenen Gärtanks vergoren. Der gekühlten Würze wird zunächst durch eine „Belüftungskerze“ Sauerstoff zugefügt und läuft dann in den sog. Anstelltank, in dem die Würze automatisch im Verhältnis 100 zu 1 mit Hefe (Anstellhefe, Satz oder Zeug genannt) angestellt (vermischt) wird. Nachfolgend wird die Würze in einen Gärtank umpumpt, wobei der sog. Kühltrub, der bei Abkühlung der klaren, heißen Würze auf eine Temperatur von 55-70 °C entsteht, zurückbleibt.

Sobald die Hefe durch Vermehrung den Sauerstoff aufgezehrt hat, setzt die eigentliche Gärung, also die Umwandlung des Malzzuckers in Alkohol und CO₂, ein. Durch den Stoffwechsel der Hefen erwärmt sich die Würze innerhalb von drei Tagen auf bis zu 10,5 °C. Nach einer weiteren Gärzeit von 3,5 Tagen bei einer durch Kühlung konstant gehaltenen Tempe-

ratur von 10,5 °C wird die Würze anschließend innerhalb von rund 12 Stunden auf 8 °C heruntergekühlt und für weitere 2 Tage bei 8 °C gehalten. Die Kühldauer von 12 Stunden ergibt sich dabei aus der gewünschten Prozeßführung.

Gegen Ende der Hauptgärung setzt sich die Hefe im Konus, d.h. im unteren Teil des Gärtanks, ab. Danach ist das Jungbier „schlauchreif“ bzw. „reif zum Fassen“ und wird in den Lagerkeller umgepumpt. Bis zur Hauptgärung wird von „Würze“, anschließend von „Jungbier“ und erst nach der Lagerung und Reifung von „Bier“ gesprochen.

Die zur Gärung verwendete Hefe wird als „Reinzuchthefer“ bezeichnet, sie kann fünf bis siebenmal im Brauprozess wiederverwertet werden. Das Unternehmen züchtet die notwendigen Hefekulturen selbst und ist damit nicht auf den Zukauf von Hefe angewiesen.

Nachgärung und Lagerung

Die Nachgärung des Bieres findet bei einer Temperatur von 8 °C bis ca. 11,5 °C im Lagertank statt und dauert etwa 10 Tage. Um eine möglichst optimale Bierqualität zu erreichen, ist es nötig, die Nachgärung langsam und stetig ablaufen zu lassen. Während der Nachgärung im Lagerkeller wird der nach der Hauptgärung noch verbliebene Malzextrakt vollständig – oder zumindest bis auf marginale Mengen – vergoren, das Jungbier mit Kohlensäure angereichert bzw. gesättigt, durch Absetzen der Hefe und anderer Trübungsteilchen eine Vorklä- rung erreicht sowie der für die Qualität des Bieres wichtige Reifungsprozess erzielt, der das Bier veredeln und den Geschmack abrunden soll.

Im Anschluß an die Nachgärung wird zunächst die restliche Hefe abgelassen, das Bier innerhalb der Lagertanks in gut 2 Tagen auf ca. 0 °C heruntergekühlt und bis zur endgültigen Ausreifung bei dieser Temperatur gehalten.

Filtration

Bevor das Bier zur Abfüllung in die verschiedenen Transportgebilde gelangt, wird das Bier über eine Kombination von Kieselgurfilter und nachgeschaltetem Schichtenfilter filtriert. Dabei erlangt das Bier seine geforderte Glanzfeinheit, selbst mikroskopisch kleine Partikel (z.B. bierverderbende Bakterien), die den Geschmack und die Haltbarkeit des Bieres mindern, werden dabei herausgefiltriert.

2.2.3 Flaschenkeller

Nach der Filtrierung wird das Bier in die sog. Drucktanks gepumpt und von dort aus je nach Bedarf in Flaschen oder Fässer abgefüllt. Die Abfüllung des Bieres erfolgt jeweils unter

Druck, wobei hier CO₂ als Spanngas eingesetzt wird. Dies ist notwendig, um einerseits den Kontakt des Bieres mit Sauerstoff zu vermeiden (Qualitätsminderung) und andererseits die Schaumbildung beim Abfüllen zu minimieren. 0 zeigt den Produktionsablauf im Flaschenkeller.

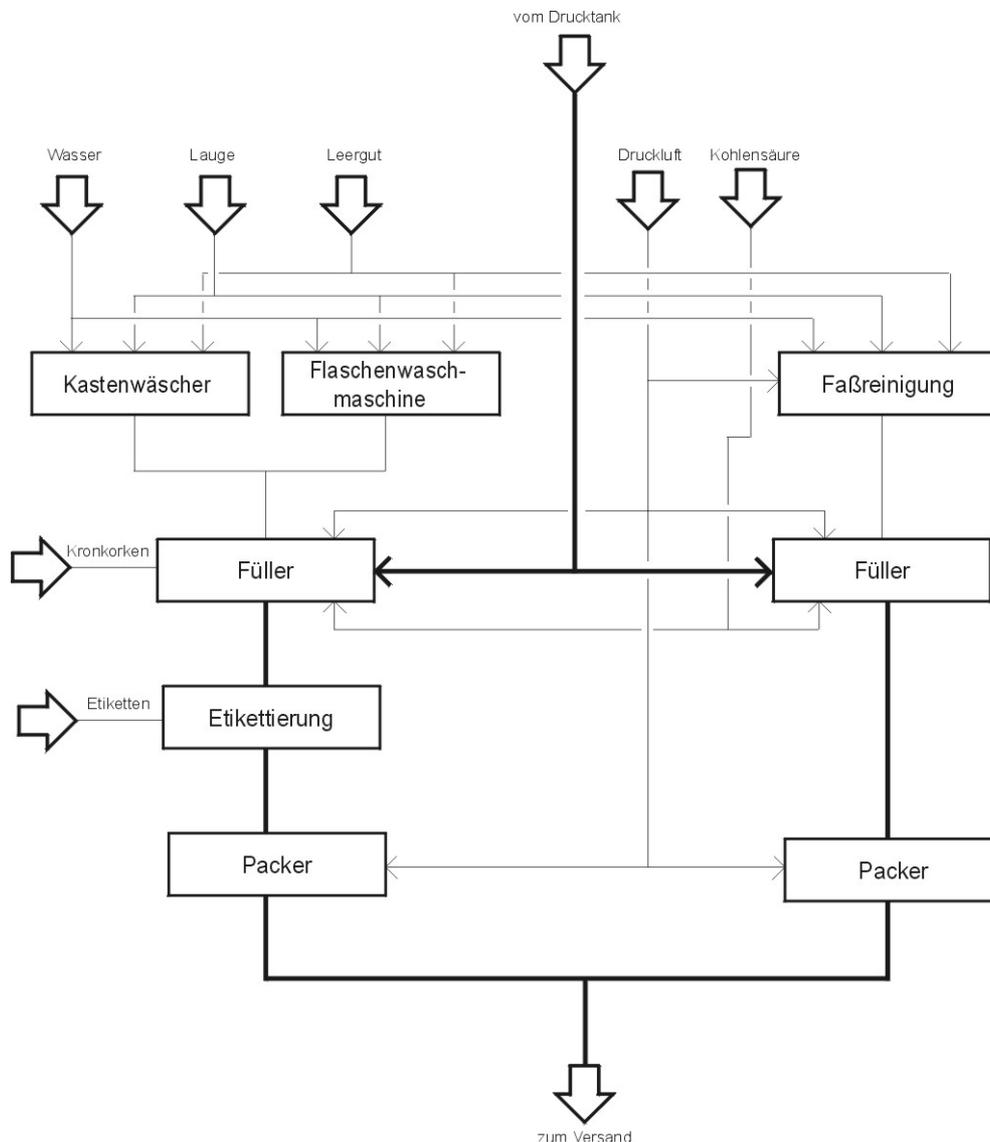


Abbildung 2.4 Grundfließbild des Flaschenkellers

Neben dem abzufüllenden Bier sind die entsprechenden Transportgebilde und die Transportbehälter ein zentraler Einsatzstoff im Flaschenkeller. Im betrachteten Unternehmen wird ausschließlich in Mehrweggebilde abgefüllt, die nach der Rücknahmen durch das Vertriebsnetz vor einer erneuten Befüllung gereinigt und sterilisiert werden müssen. Dies geschieht im Vorfeld der Abfüllung in den Reinigungsanlagen. Im betrachteten Unternehmen werden sog. Keg-Fässer und Flaschen abgefüllt. Für die Faß- und Flaschenabfüllung existiert jeweils eine getrennte Reinigungs- und Abfüllstraße.

Faßabfüllung

Bevor das Bier in die verschieden großen Fässer abgefüllt werden kann, werden die Behälter zunächst aufwendig gereinigt. Vor dem Befüllen der Fässer müssen diese absolut steril sein, um einerseits ein Verderben des Bieres und andererseits Gesundheitsgefahren durch Keime und Bakterien zu verhindern. Die Fässer werden hierzu zunächst manuell auf ein Transportband gegeben und in einer Außenreinigungsanlage mit heißem Wasser beaufschlagt und mechanisch gereinigt. Sie gelangen dann über eine Transportstraße in die Innenreinigung, welche ebenso wie das Befüllen der Fässer in einer Anlage „online“ erfolgt, wobei mit Hilfe entsprechender Arbeitsköpfe insgesamt sechs Arbeitsschritte durchlaufen werden. Ein Arbeitsschritt dauert dabei jeweils etwa eine Minute. Das leere Faß wird zunächst mit heißem Wasser ausgespült und anschließend mittels Druckluft wieder entleert. Der nachfolgende Arbeitskopf spritzt das Faß mit heißer Natronlauge aus und entleert anschließend wieder. Im anschließenden Arbeitsgang wird die Lauge mit Säure neutralisiert; im nächsten wird das Faß erneut mit heißem Wasser gespült und sorgfältig durch Druckluft geleert. Das Faß wird mit 120 °C heißem Dampf beaufschlagt und somit sterilisiert. Im abschließenden Arbeitsschritt wird das Faß zunächst mit Kohlensäure beaufschlagt und anschließend mit Bier gefüllt. Die befüllten Fässer werden über ein Transportband zur Palletierung gefördert und in den Versand gebracht.

Flaschenabfüllung

Im Gegensatz zur Faßabfüllung gestaltet sich die Flaschenabfüllung deutlich aufwendiger. Dies liegt neben der wesentlich aufwendigeren Reinigung der Flaschen auch in der komplizierteren Abfüllung begründet. Hinzu kommt, daß sowohl 0,33 l - als auch 0,5 l Flaschen befüllt werden.

Analog zur Faßabfüllung erfolgt zunächst eine Reinigung der Transportbinde. Die Reinigung der Flaschen erfolgt in der Flaschenmaschine, die Kästen reinigt der sog. Kastenwäscher. Hierzu werden zunächst die Kunststoffkästen und die Flaschen voneinander getrennt. Dies erfolgt über einen druckluftgetriebenen Auspacker, der mittels Druckluft und entsprechenden Tastköpfen die Flaschen mittels Unterdruck auf ein Transportband zur Waschmaschine und die Kästen auf ein zweites Transportband zum Kastenwäscher bringt. Während im Kastenwäscher die Abspritzung der Kunststoffkästen mit warmem Wasser unter hohem Druck erfolgt, werden die Flaschen in der Waschmaschine aufwendig gereinigt.

Hierzu gelangen sie zunächst vom Förderband aus in die endlose Transportkette der Waschmaschine, die kontinuierlich durch die Anlage fährt. Sie werden zunächst gekippt, um mögliche Restinhalte zu entleeren und durchlaufen anschließend die sog. Vorweiche, ein Laugebad mit einer Temperatur von etwa 45 - 50 °C. In der anschließenden „Heißlauge“ werden die Flaschen erneut gewendet und laufen mit Heißlauge (ca. 80 °C) voll. In der Heißlauge lösen sich auch die Flaschenetiketten und werden über ein Siebsystem ausgetra-

gen. In der Wendekammer der Maschine werden die Flaschen erneut gekippt und laufen dabei leer. Im oberen Teil der Heißlauge werden die Flaschen mittels Pumpen und Strahlern mit Heißlauge ausgespritzt. Sie durchlaufen nachfolgend ein weiteres Laugebad bei rund 70 °C. Im nachfolgenden Abteil werden die leeren Flaschen mit warmen Wasser ausgespritzt und durchlaufen nachfolgend zwei weitere Wasserbäder, wobei sie einerseits klargespült und andererseits abgekühlt werden. Die Flaschen verlassen die Waschmaschine letztlich mit einer Temperatur von rund 15 - 20 °C, die zur Befüllung geeignet ist.

Die Flaschenwaschmaschine und der Flaschenfüller arbeiten gleichzeitig und mit aufeinander abgestimmter Kapazität, so daß die gereinigten Flaschen direkt zum Füller gelangen. Zuvor durchlaufen sie den sog. Flascheninspekteur. Dessen Aufgabe ist die Kontrolle der Flaschen und das Aussortieren schadhafter Flaschen. Die eigentliche Füllung der Flaschen erfolgt analog zur Faßbefüllung. Die Flaschen werden mit CO₂ vorgespannt und anschließend gefüllt. Ein Hochdruckwasserstrahl sorgt für ein kurzes Aufschäumen, um etwaigen Sauerstoff aus der Flasche zu entfernen. Im Anschluß an die Befüllung erfolgt der Verschuß und die Etikettierung der Flaschen und die anschließende Befüllung der Transportkästen.

Die Betriebszeiten der Abfüllanlagen unterscheiden sich je nach Absatzsituation. Als Mittelwert kann jedoch angenommen werden, daß während der Sommermonate in zweieinhalb Schichten Flaschen und in zwei Fässer befüllt werden. Während der absatzschwächeren Wintermonate hingegen werden beide Anlagen jeweils eineinhalbschichtig betrieben.

2.2.4 Nebeneinrichtungen

Wie bereits Abbildung 2.1 dargestellt, nehmen die Nebeneinrichtungen des Unternehmens wichtige Aufgaben der Ver- und Entsorgung des Produktionsprozesses wahr. Zu den Nebeneinrichtungen zählen vor allem das Kesselhaus (Wärmebereitstellung), die Kälteanlagen, die Druckluftversorgung, die CIP-Reinigungsanlagen und die Wasseraufbereitung. Darüber hinaus sind zahlreiche weitere Hilfseinrichtungen (z.B. Unterverteilungen beim Strom, Dosierpumpen für die Wasseraufbereitung, Wärmeverteiler etc.) vorhanden. Die nachfolgende Beschreibung der Nebeneinrichtungen bleibt dabei allerdings auf die wesentlichen Punkte beschränkt. Abbildung 2.5 zeigt das Grundfließbild der Nebeneinrichtungen.

In Abbildung 2.5 ist zunächst das Grobschema der Produktion mit den drei Teilbereichen „Sudhaus“, „Gär- und Lagerkeller“ sowie dem „Flaschenkeller“ zu erkennen. Der Produktionsprozeß wird von den links angeordneten Einrichtungen (Kesselhaus, Kälteanlagen, Druckluftversorgung, CIP-Anlagen und Wasseraufbereitung) versorgt und von den rechts dargestellten Einrichtungen (Trebersilo und Abwassersammler) entsorgt. Die komplexen Einrichtungen werden nachfolgend detaillierter betrachtet.

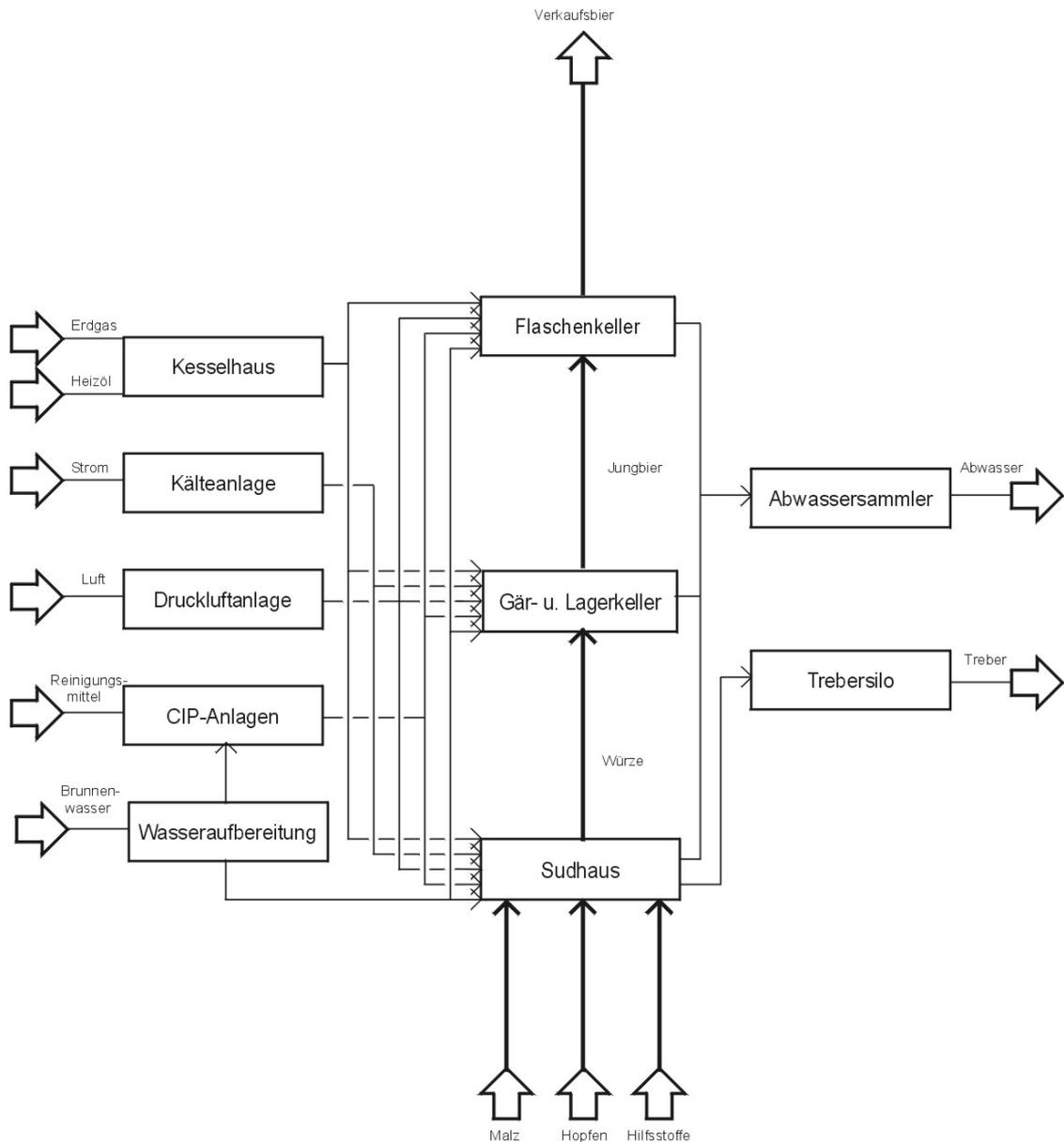


Abbildung 2.5 Grundfließbild der Nebeneinrichtungen

Kesselhaus

Das Kesselhaus beinhaltet den Sattdampfkessel des Unternehmens, der den notwendigen Dampf zur Beheizung der Produktionsanlagen und der Gebäude bereitstellt, einschließlich aller Ver- und Entsorgungseinrichtungen des Kessels (Kondensatbehälter, Speisewasserbehälter etc.). Der vorhandene Großraumwasserrohrkessel wurde 1994 im Unternehmen installiert und ist in einem technisch einwandfreien Zustand. Er verfügt über einen Rauchgas-Economizer und einen Kombibrenner, der sowohl im Gas- als auch im Ölbetrieb gefahren

werden kann. Der Brenner ist dabei stufenlos regelbar, der Lüfterantriebsmotor frequenzge-regelt.

Der Kessel besitzt eine Wärmeleistung von 3.600 kW und erzeugt stündlich max. 5,5 t Satt-dampf bei 10 bar absolut. 1998 wies der Kessel eine Laufzeit von rund 3.670 h auf. Der Dampf gelangt vom Kessel aus zum Dampfverteiler, welcher die verschiedenen Dampf-schienen bedient. Auffällig ist auch der mit 77 % des Kesselwassers hohe Anteil des Kon-densatrücklaufes im Unternehmen sowie die mit ca. 85 °C hohe Kondensatrücklauftempe-ratur, was für den guten Zustand der Rohrleitungen und deren gute Isolierung spricht.

Druckluft

Das Unternehmen verfügt über zwei prinzipiell baugleiche Druckluftstationen, die aus histori-schen Gründen zwei getrennte Betriebsteile versorgen. In den Stationen sind zwei bzw. drei Kolbenverdichter installiert, die die angesaugte Umgebungsluft auf den Betriebsdruck der Luftversorgung von 6 bar(ü) verdichten. Jeweils zwei baugleiche Verdichter mit einer För-derleistung von jeweils 180 m³/h bei 6 bar(ü) und einer Antriebsleistung von jeweils 22 kW stellen Arbeitsluft über einen gemeinsamen Druckbehälter zur Verfügung. Ferner sind pro Druckluftstation zwei Kältetrockner zur Trocknung der Druckluft installiert. Die Regelung der Arbeitsluftanlage erfolgt über einen Druckschalter im Druckluftspeicher, wobei die Kompres-soren je nach Druckniveau nacheinander zugeschaltet werden. Die Folgeschaltung der Ag-gregate wechselt dabei, um beide Maschinen gleichmäßig zu nutzen.

Eine Besonderheit bei der Druckluftbereitstellung stellt die Tatsache dar, daß neben der Ar-beitsluft für pneumatische Förder- und Regelungsanlagen sog. Reinluft bereitgestellt werden muß. Diese wird in der Abfüllung zur Entleerung der Transportbinde verwendet und muß frei von jeglichen Keimen und Verunreinigungen sein. Hierzu wird eine parallele Luftversor-gung betrieben, die aus einer Filteranlage, einem Kolbenverdichter mit integriertem Trockner und einem Speicherbehälter besteht. Der entsprechende Verdichter stellt dabei max. 360 l/min bei 10 bar(ü) zur Verfügung. Die Antriebsleistung des Aggregates beträgt dabei 2,4 kW.

Kälteanlage

Zur Bereitstellung der erforderlichen Prozeßkälte betreibt das Unternehmen zwei baugleiche Kälteanlagen. Sie bestehen aus jeweils zwei ebenfalls baugleichen Kolbenverdichtern; beide Anlagen werden mit dem Kältemittel „Ammoniak“ betrieben. Die Antriebsleistungen der Ver-dichter betragen jeweils 18,5 kW. Der Druck im Hochdruckteil der Kälteanlage beträgt 16 bar(ü). Die Rückkühlung des Kältemittels erfolgt durch Außenluft-Rieselkühler, die jeweils auf den Dächern oberhalb der Kälteanlagen installiert sind.

Die Kälteleistung wird zur Versorgung des Sudhauses in einen Eisspeicher eingebracht. Die Kälteanlage kühlt dabei das Wasser auf eine Temperatur von ca. 1 °C (sog. Eiswasser) herab. Die zweite Anlage dient der Versorgung des Gär- und Lagerkellers und arbeitet auf einen Solespeicher; sie kühlt die Sole auf eine Temperatur von –10 °C ab.

Die Kälteanlage im Sudhaus zur Erzeugung des Eiswassers, die einen Eisspeicher mit einer Kühlkapazität von ca. 990 kWh bedient, hat insgesamt eine Kälteleistung von 90 kW. Die Kälteanlage des Gär- und Lagerkellers stellt eine Kühlleistung von 100 kW bereit. Die Speicherkapazität des Solespeichers entspricht etwa der des Eisspeichers. Durch die integrierten Kältespeicher ist das Unternehmen in der Lage, die Kältevorräte mit günstigem Nachtstrom aufzufüllen. Die Kälteanlagen laufen daher nur in Bedarfsspitzenzeiten im Sommer auch während der Hochtarifzeiten des Strombezugs.

CIP-Anlagen

Die CIP-Anlagen (Cleaning In Process) bezeichnen eine sehr aufwendige Infrastruktur zur Reinigung der Produktionsanlagen während des eigentlichen Betriebes. Hierzu sind in beinahe allen Betriebsteilen Vorratsbehälter mit Lauge und Desinfektionsmitteln, entsprechende Dosierstationen und Regeleinrichtungen installiert. Die Reinigungsanlagen sind daher vollständig automatisiert und sorgen für eine Reinigung aller Sudgefäße und Transportleitungen nach jedem Sud. Die CIP-Anlagen sind für die Sterilität und die Qualität des Produktes von entscheidender Bedeutung. Aus diesem Grunde werden sie an dieser Stelle explizit benannt. Die CIP-Anlagen sind jedoch hinsichtlich ihres Energiebedarfs von untergeordneter Bedeutung.

Wasseraufbereitung

Das Unternehmen ist hinsichtlich der Wasserversorgung autark. Der jährliche Wasserverbrauch von rund 53.000 m³/a (6,6 hl Frischwasser / hl Verkaufsbier) wird durch drei eigene Brunnen bereitgestellt. Die Brunnenpumpen erlauben dabei eine maximale Förderung von ca. 18 m³/h. Das Brunnenwasser wird in der Wasseraufbereitung enthärtet und anschließend in die beiden Puffertanks mit jeweils 70 m³ Speicherkapazität gepumpt. Von dort wird die gesamte Betriebswasserversorgung organisiert. Beide Behälter werden mittels Druckluft auf einen Wasserdruck von 4,5 bar eingeregelt.

Trebersilo

Die unlöslichen Malzbestandteile (Treber) werden im Läuterbottich, der sog. Heißtrub im Whirlpool von der Würze getrennt. Sie stellen einen organischen Rückstand dar, der ein be-

gehrtes Futtermittel in der Landwirtschaft darstellt. Der Treber wird zunächst mittels einer Förderschnecke aus dem Läuterbottich ausgetragen und gelangt in eine Druckleitung. Dort wird mittels Druckluft ausgetrebert, d.h. der Treber mit Druckluft in das Trebersilo gefördert. Die entsprechenden Leitungen werden anschließend durch eine Beaufschlagung mit Dampf gereinigt. Neben dem eigentlichen Treber wird auch der im Whirlpool ausgeschiedene Heißtrub dem Trebersilo manuell zugeführt. Es dient dabei als Pufferspeicher und übernimmt die Abfüllung an die entsprechenden Landwirte.

Abwassersammler

Im Abwassersammler werden zunächst alle betrieblichen Abwässer zusammengeführt. Ihm kommt die Aufgabe zu, durch eine Zwischenspeicherung und Beruhigung der Abwässer - dies ermöglicht entsprechende Sedimentationsvorgänge - den Feststoff- und vor allem den CSB-Gehalt des Abwassers zu senken. Dies dient in erster Linie der Reduktion der Abwassergebühren. Jährlich fallen im Unternehmen rund 23.000 m³ Abwasser an.

2.3 Erfassung der energetischen Betriebsdaten und Erarbeitung einer Energiebilanz

Auf der Grundlage der vorhergehenden Beschreibung des Produktionsablaufes und der Betriebsorganisation wird nachfolgend eine betriebliche Energiebilanz erarbeitet. Grundlage dieser Energiebilanz bildet die bezogene Endenergie im Bilanzjahr 1998, wobei die Energieträger „Erdgas“, „Heizöl EL“ und „Strom“ berücksichtigt werden. Der Endenergieeinsatz wird des weiteren für einzelne Produktionsschritte detailliert untersucht und in die sechs Anwendungsgebiete

- Prozeßwärme,
- Raumwärme,
- Brauchwarmwasser,
- Kraft,
- Beleuchtung und
- Kommunikation

nach ihrer energetischen Bedeutung aufgeschlüsselt. Für die genannten Anwendungsbereiche werden die bestehenden Verbrauchsschwerpunkte sowie die derzeitige Energieversorgung dargestellt. Die detaillierten Ergebnisse der Untersuchung sind sowohl in Form einer Übersicht als auch disaggregiert für jeden Energieanwendungsbereich in den Tabellen 2.1 bis 3.3 dargestellt und werden in den Kapiteln 2.3.1 – 2.3.6 ausführlich diskutiert.

Im Bilanzjahr 1998 betrug der Endenergieverbrauch des Unternehmens 3,44 Mio. kWh, wobei mit rund 38 % der größte Anteil auf den Energieträger Erdgas entfällt (vgl. Abbildung 2.6). Des Weiteren wird zur Wärmegegung Heizöl EL mit einem Verbrauchsanteil von 36 % eingesetzt. Die Strombilanz des Betriebes weist für 1998 einen Stromverbrauch von ca. 0,90 Mio. kWh aus, welches einem Verbrauchsanteil am Gesamtverbrauch von 26 % entspricht. Der Brennstoff wird zur Gesteung von Prozeßwärme, Raumwärme und Brauchwarmwasser eingesetzt. Der Stromeinsatz erstreckt sich über die Kraftgeseung, die Beleuchtung, den Betrieb von Kommunikationsanlagen bis zum Einsatz von elektrischen Durchlauferhitzern.

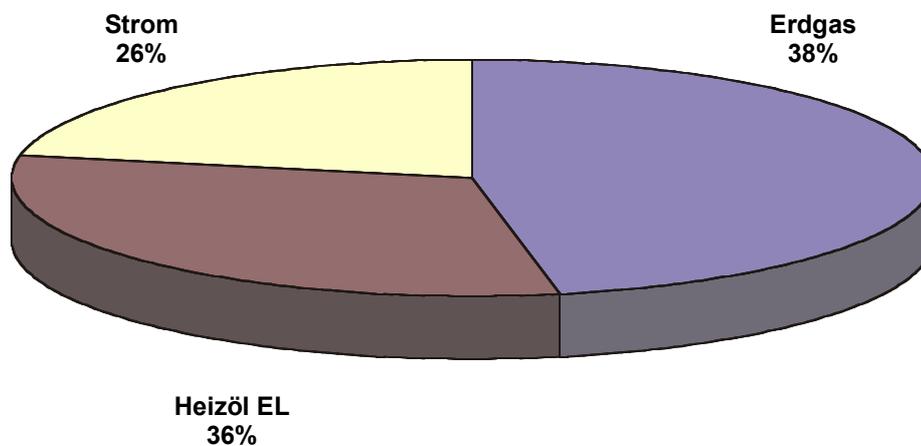


Abbildung 2.6 Struktur des Endenergieträgereinsatzes der Brauerei in Höhe von rund 3,44 Mio. kWh im Jahr 1998

Für die Wärmegegung durch Erdgas und Heizöl wird rund 74 % des gesamten Endenergieverbrauchs aufgewendet. Davon entfällt der Großteil, etwa 62,4 %, auf den Bedarf an Prozeßwärme. Weitere 0,17 Mio. kWh bzw. 6,0 % des Brennstoffverbrauchs werden für die Beheizung der Betriebshallen bzw. der Verwaltungsräume eingesetzt. Der Brennstoffbedarf für die Brauchwarmwassergesteung ist mit 8.300 kWh (ca. 0,3 % des Brennstoffverbrauchs) dagegen äußerst gering.

Der 1998 eingesetzte Strom diente überwiegend der Kraftgeseung, also dem Antrieb von Elektromotoren für verschiedenste Transportprozesse sowie für die Kälte- oder Druckluftezeugung. Mit rund 181.300 kWh entfallen 20,4 % des gesamten Stromverbrauchs allein auf den Antrieb der Kompressionskälteanlagen für die Bereitstellung der erforderlichen Kälte. Etwa 9,2 % (ca. 82.000 kWh) wurden im Bereich der Flaschen- bzw. Faßabfüllung benötigt. Der Anteil am Stromverbrauch im Bereich des Gär- und Lagerkellers sowie für Antriebe im

Bereich Filtration und Drucktanks liegt zusammen bei 7,7 %, welches einem Stromverbrauch von etwa 69.000 kWh entspricht. Für die Bierherstellung werden weiterhin ca. 5,1 % im Sudhaus sowie etwa 2,4 % des Strombedarfes in der Schrotrei benötigt. Die Nebenanlagen wie z.B. die Drucklifterzeugung, die Wasseraufbereitung oder die CIP-Anlage benötigen zusammen etwa 39 % des bezogenen Stroms. Neben der Kraftgesehung wird außerdem Strom für die Beleuchtung (ca. 42.000 kWh bzw. 4,7 %), für die Kommunikation, die EDV und die Verwaltung (18.900 kWh bzw. 2,1 %) benötigt.

Eine zusammenfassende Betrachtung des Brennstoff- und Stromverbrauchs im Hinblick auf deren Verteilung auf die verschiedenen Energieanwendungen zeigt, daß insgesamt rund 51 % des Endenergieeinsatzes auf die Prozeßwärmeversorgung entfallen. Etwa 22 % der Energie wird für den Antrieb von Elektromotoren eingesetzt. Für die Beheizung der Betriebs- und Verwaltungseinrichtungen werden etwa 5 % der eingesetzten Endenergie verwendet. Rund 1,2 % des Energieverbrauchs findet Anwendung in der Beleuchtung. Von eher untergeordneter Bedeutung ist der Energieverbrauch für die verbleibenden Anwendungen, die Bürokommunikationssysteme mit 0,6 % und die Brauchwarmwassergesehung mit 0,2 %. Die aufgeführte Struktur des Energieverbrauchs gibt Abbildung 2.7 in Form eines Energieflußbildes (Sankey-Diagramm) wieder. Die weitere Detaillierung der Ergebnisse, wie sie Abbildung 2.7 darstellt und infolge der Betriebsbegehungen ermittelt wurde, ist Gegenstand der nachfolgenden Kapitel.

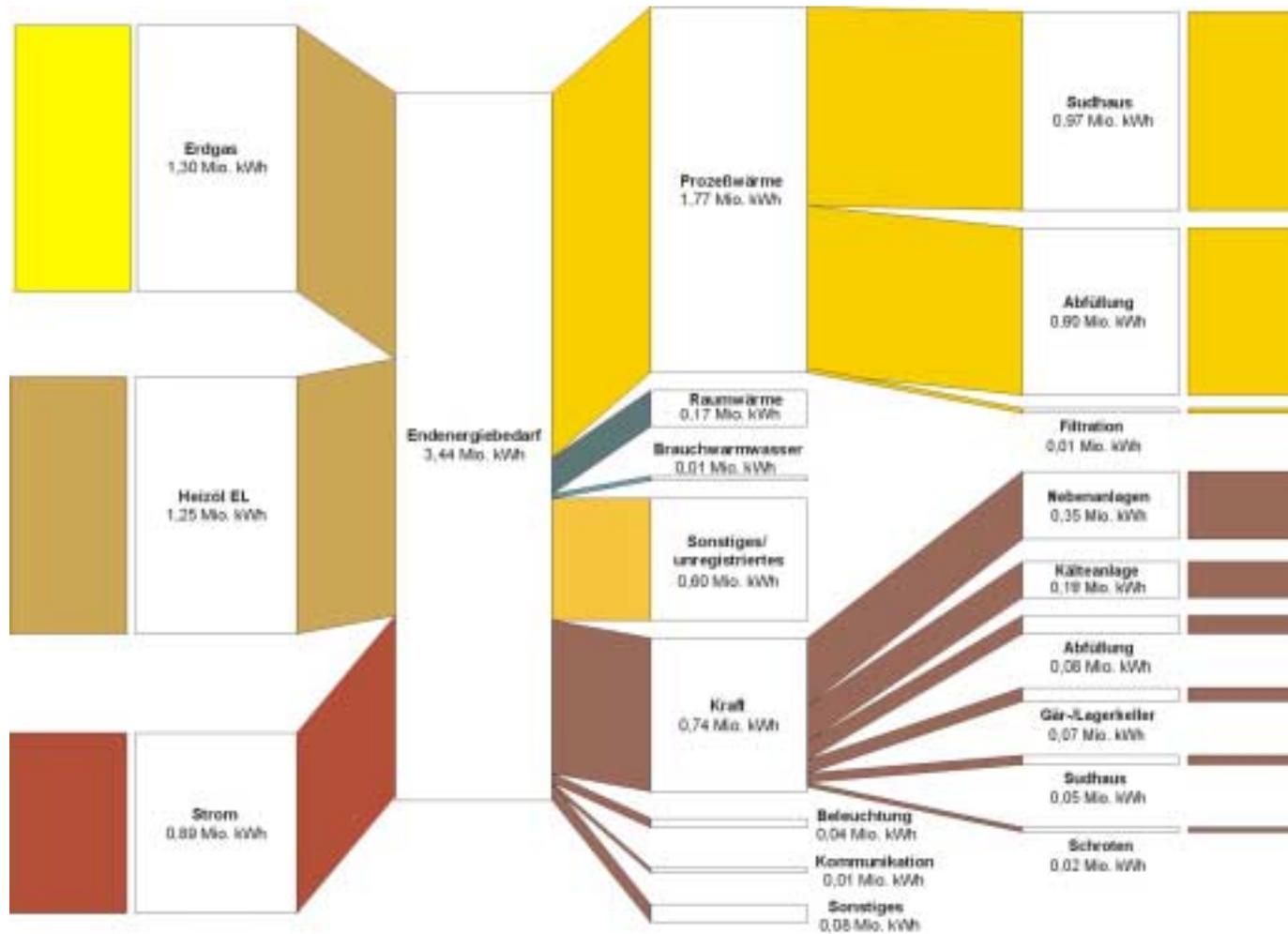


Abbildung 2.7 Energieflußdiagramm des untersuchten Betriebes für das Betriebsjahr 1998

2.3.1 Prozeßwärme

Ist-Zustand

Die wesentlichen Anwendungsbereiche der Prozeßwärme in Brauereien sind das Sudhaus mit rund 37,8 % des gesamten Brennstoffbedarfs sowie die Faß- bzw. Flaschenabfüllung mit etwa 31,4 %. Im Sudhaus wird der Prozeßdampf zum Erwärmen des Brauwassers auf die durch den Brauprozess geforderten Mindesttemperaturen sowie für das Würzekochen benötigt. Hauptwärmeverbraucher im Bereich der Abfüllung sind die Faß- oder Flaschenreinigungsmaschinen. Überdies fallen durch den diskontinuierlichen Brauprozess im gesamten Betrieb fortlaufend Reinigungsaufgaben an, für die entweder Dampf oder Heißwasser erforderlich sind.

Der benötigte Prozeßdampf wird im Kesselhaus mittels eines 1994 installierten Großraumwasserrohrkessels in Form von Niederdruck-Sattdampf (10 bar absolut) bereitgestellt. Der Kessel ist mit einem Zweistoffbrenner ausgerüstet und kann wahlweise mit Erdgas oder Heizöl befeuert werden. Der erzeugte Frischdampf gelangt vom Kessel zum Dampfverteiler, der die Versorgung der verschiedenen Verbrauchsbereiche sicherstellt. Das Kondensat wird über einen offenen Kreislauf zum Kessel bzw. zum Kondensatsammelbehälter zurückgeführt.

Im zugrundegelegten Bilanzjahr 1998 wurde dem Kessel 787 m³ Zusatzwasser zugeführt. Da im untersuchten Betrieb ein Kondensatrücklauf von 77 % der erzeugten Dampfmenge zu verzeichnen ist, läßt sich der vom Kessel bereitgestellte Dampf auf rund 3.356 t/a berechnen. Aus dem Dampfmassenstrom ergibt sich eine bereitgestellte Wärmemenge von 2,2 Mio. kWh. Die dem Kessel zugeführte Endenergie verteilt sich auf etwa 1,3 Mio. kWh Erdgas sowie 1,25 Mio. kWh Heizöl EL. Der durchschnittliche Jahresnutzungsgrad berechnet sich aus dem Quotient der bereitgestellten Wärmemenge sowie der im Brennstoff gebundenen Endenergie, wodurch sich insgesamt ein Nutzungsgrad von rund 86 % ergibt.

Da im untersuchten Betrieb neben den Hauptzählern keine weiteren Unterzähler vorhanden sind, wird im folgenden die Wärmebilanzierung für Teilbereiche des Betriebes anhand von definierten Prozeßparametern durchgeführt.

Maischen

Beim Maischen, also dem Lösen der Schrot- bzw. Malzbestandteile im Brauwasser, werden verschiedene Temperaturstufen für definierte Zeitrasten eingehalten. Für das Einmaischen werden pro Sud rund 80 hl Brauwasser mit einer Temperatur von 60,5 °C benötigt. Für die Bereitstellung des Einmaischwassers wird einerseits Heißwasser mit einer Temperatur von etwa 82 °C aus einem der beiden 140 hl fassenden Speicherbehälter entnommen und andererseits frisches Brauwasser, um die vorgegebene Einmischtemperatur von 60,5 °C zu erreichen. Wenn für das kalte Brauwasser im Jahresmittel eine Temperatur von rund 11 °C

zugrunde gelegt wird, ergibt sich demzufolge ein Mengenverhältnis von 24,2 hl kaltem Brauwasser zu 55,8 hl warmen Wassers aus den Speicherbehältern.

Das Einmischwasser wird im Zuge des Maischprozesses nachfolgend auf 64°C erwärmt. Hierzu wird die sog. Maischepfanne mit Dampf über Heizschlangen erwärmt. Der erforderliche Dampf- bzw. Wärmebedarf ergibt sich aus der gewünschten Temperaturdifferenz von 3,5 K, bei einer mittleren spezifischen Wärmekapazität von 4,19 kJ/kg, dem spezifischen Gewicht von Wasser (rund 1.000 kg/m³) sowie der zu erwärmenden Wassermenge von 80 hl bzw. 8 m³. Für die angeführten Parameter berechnet sich der Wärmebedarf für die erste Temperaturstufe im Maischprozeß zu 32,6 kWh pro Sud.

Durch Zugabe der Malzbestandteile sowie durch Volumenausdehnungen wird für die weiteren Berechnungen von einem Volumen in der Maischepfanne von 90 hl ausgegangen. Die Maische durchläuft nachfolgend verschiedene Temperaturstufen, wobei die Maische insgesamt um weitere 14 K erwärmt wird. Der hierfür benötigte Wärmebedarf ergibt sich zu 146,7 kWh, so daß im gesamten Maischprozeß für die Erwärmung der Maische ein Wärmebedarf von 179,4 kWh anfällt.

Abläutern

Der nächste Prozeßschritt ist das sog. Abläutern, also das Trennen der löslichen von den unlöslichen Malzbestandteilen. Um die nach dem Abläutern der sog. Vorderwürze in den Trebern verbliebene Restwürze zu nutzen, wird der Läuterbottich mit sog. Nachgüssen (Heißwasser) durchspült. Für den ersten Nachguß wird 16 hl warmes Wasser bei einer Temperatur von rund 78 °C benötigt. Das gewünschte Temperaturniveau wird wiederum aus einer Mischung des 82 °C warmen Wassers aus den Speicherbehältern sowie des kalten Brauwassers mit einer angenommenen mittleren Jahrestemperatur von 11 °C erreicht. Unter den angeführten Annahmen wird dem Speicherbehälter etwa 15 hl Wasser entnommen und die restlichen 1 hl entfallen auf kaltes Brauwasser.

Der zweite Nachguß erfolgt mit 26 hl, der dritte mit 7 hl Wasser, wobei wiederum eine Temperatur von 78 °C einzuhalten ist. Demzufolge wird aus dem Heißwasserspeicher 25,5 bzw. 6,6 hl Wasser herangezogen, so daß sich insgesamt ein Warmwasserbedarf für die Nachgüsse von rund 47 hl pro Sud berechnen läßt.

Würzekochen

Im nächsten Bearbeitungsschritt, dem Würzekochen, wird durch Verdampfen des überschüssigen Brauwassers die gewünschte Würzekonzentration eingestellt. In der Würzepfanne wird insgesamt ein Volumen von 127 hl bis zum Siedepunkt erhitzt und nachfolgend etwa 7 hl Brauwasser verdampft.

Um den Wärmebedarf für diese beiden Prozeßschritte bestimmen zu können, muß zunächst die Anfangstemperatur der Würze, bei der die Erwärmungsphase in der Würzepfanne beginnt, ermittelt werden. Das Abmaischen, also das Umpumpen der Maische aus der Maischepfanne in den Läuterbottich und anschließend in die Würzepfanne, beginnt bei einer Temperatur von 74 °C. Unter der Annahme, daß sich die sog. Vorderwürze durch Wärmeverluste insgesamt auf eine Temperatur von 70 °C abkühlt und die Nachgüsse (zusammen 49 hl) bei einer Temperatur von 78 °C durchgeführt werden, ergibt sich in etwa eine Temperatur der in der Pfanne befindlichen Würze von 73 °C.

Für den ersten Prozeßschritt, das Erwärmen der Würze (127 hl) von 73 auf 100 °C, ist somit ein Wärmebedarf von rund 400 kWh erforderlich. Für die Verdampfung von 7 hl Wasser werden nachfolgend weitere 440 kWh benötigt.

Zusammenfassung Sudhaus

Die oben ausgeführten Berechnungen zum Prozeßwärmebedarf des Sudhauses beziehen sich jeweils auf einen Sud. Dabei ist insgesamt ein Wärmebedarf von rund 180 kWh für das Maischen und 840 kWh für das Würzekochen berechnet worden, welches einen Wärmeverbrauch von 1.020 kWh pro Sud ergibt. Bei durchschnittlich 666 Suden pro Jahr (Bilanzjahr 1998) bedeutet dies einen Nutzwärmebedarf (ohne Berücksichtigung von Wärmeverlusten) von 678.000 kWh.

Als Wärmeverluste im Sudhaus sind insbesondere die Konvektionsverluste der Sudgefäße sowie der Dampfleitungen zu nennen oder die Wärmeabfuhr durch heiße Treber bzw. Abwässer. Werden dabei alle Verlustarten zusammengefaßt, kann daher ein zwanzig prozentiger Zuschlag als realistisch eingestuft werden. Weiterhin sind die Gefäße im Sudhaus sowie die Transportleitungen an das automatische Reinigungssystem (CIP-Anlage) angeschlossen. Der Wärmebedarf für die Reinigung wird mit einem Anteil von 5 % des Wärmebedarfes für das Sudhaus abgeschätzt. Zusammengefaßt bedeutet dies, daß etwa 830.400 kWh an Nutzwärme auf den Brauprozeß im Sudhaus entfallen. Um die erforderliche Nutzwärme abschließend auf die bezogene Endenergie umrechnen zu können, wird der nachfolgend ermittelte Jahresnutzungsgrad des Dampferzeugers zugrunde gelegt.

Jahresnutzungsgrad des Dampferzeugers

Der Jahresnutzungsgrad des Dampferzeugers gibt das Verhältnis der jeweils auf Jahresbasis im Dampf zur Verfügung gestellten Wärmemenge zur Wärmemenge im Brennstoff wieder.

$$\eta = \frac{Q_D}{Q_{Br}}. \quad (2.1)$$

Da hierbei Jahresdaten gegenübergestellt werden, wird sowohl der Gesamtwirkungsgrad des Dampferzeugers als auch dessen Teillastverhalten berücksichtigt.

Die jährlich erzeugte Dampfmenge kann jedoch nicht direkt angegeben werden, sondern ergibt sich aus der gemessenen Zusatzwassermenge, also Wasser, welches dem Dampfkreislauf aufgrund von Dampfverlusten zugefügt werden muß. Unter der Angabe eines Kondensatrücklaufes von 77 % des zugeführten Kesselspeisewassers ergibt sich für einen Zusatzwasserverbrauch von 787 m³ im Bilanzjahr 1998 eine Dampferzeugung von 3.356 t. Das heißt, daß eine Nutzwärme von 2,2 Mio. kWh durch den Dampf übertragen wird. Bei einem Brennstoffeinsatz von insgesamt 2,55 Mio. kWh berechnet sich der durchschnittliche Jahresnutzungsgrad des Dampferzeugers zu 86 % und somit das Verhältnis von Nutzenenergie zu eingesetzter Endenergie zu 1:1,16.

Das bedeutet, daß der oben angeführte Nutzwärmebedarf des Sudhauses von insgesamt 830.400 kWh einem Endenergiebedarf von 1,19 Mio. kWh im Bilanzjahr 1998 entspricht. Bezogen auf den gesamten Endenergieverbrauch zur Wärmeerzeugung liegt der Anteil des Sudhauses bei 37,8 %.

Wärmerückgewinnung Sudhaus

Im Brauprozeß findet an zwei Stellen eine wesentliche Rückgewinnung der eingesetzten Wärme statt. Zum einen ist dies ein Pfannendunstkondensator, der die durch die Würzekochung entstehenden Brüden niederschlägt und die Kondensationswärme nutzt, um kaltes Brauwasser aufzuwärmen. Dabei werden durchschnittlich etwa 65 hl 11 °C kaltes Brauwasser durch die Kondensationswärme von 7 hl zu verdampfendes Wasser aus der Würze auf ca. 80 °C erwärmt, welches anschließend dem Warmwasserspeicher zugeführt wird.

Eine weitere Möglichkeit der Wärmerückgewinnung wird durch den Einsatz des sog. Würzekühlers genutzt. Dabei wird die notwendige Abkühlung der heißen Würze im ersten Teil des Wärmeübertragers durch eine Gegenstromführung von Würze und kaltem Brauwasser erzielt. Nach einer Heißtrubentfernung im Whirlpool stehen 114 hl Würze bei einer Temperatur von etwa 95 °C am Wärmeübertrager an. Aufgrund der gemessenen Temperaturdifferenz des ein- und austretenden Brauwassers von 75 K und einer angenommenen Temperaturdifferenz der abzukühlenden Würze von 85 K ergibt sich bei einem Wärmetauscherwirkungsgrad von 0,9 ein Volumenstromverhältnis von Würze zu Brauwasser von 1:1,23.

Filtration

Der Wärmebedarf für die Filtration des Jungbieres wird zum einen nach einem Warmwasserbedarf für die Reinigung und zum anderen nach einem Warmwasserbedarf für Spülzwecke unterschieden. Für die Reinigung des Filters werden nach Brauereiangaben in etwa pro Filtration 5-7 hl Wasser bei einer Temperatur von 90 °C benötigt. Unter der Annahme, daß je Filtration etwa 6 hl, also 0,6 m³ Wasser von 11 °C (mittlere Jahrestemperatur des Brauwassers) auf 90 °C erwärmt werden, ergibt sich bei einer spezifischen Wärmekapazität des Wassers von 4,19 kJ/kg ein Wärmebedarf von ca. 55 kWh/Filtration. Durchschnittlich wird im untersuchten Betrieb im Sommer zweimal pro Woche, im Winter einmal wöchentlich gefiltert, so daß mit einer mittleren Zahl von 80 Filtrationen pro Jahr gerechnet wird. Aufgrund dessen ergibt sich ein Nutzwärmebedarf für die notwendige Wassererwärmung des Reinigungswassers von 4.410 kWh im Bilanzjahr 1998.

Für die Spülung des Filters wird ebenfalls warmes Wasser benötigt. Je Filtration ist dabei eine Wassermenge von 3,5 hl mit einer Temperatur von 60°C erforderlich, so daß sich unter den oben genannten Randbedingungen ein Nutzwärmebedarf für die Spülung des Filters im Bilanzjahr 1998 von insgesamt 1.600 kWh berechnet.

Für den Bereich der Filtration ergibt sich somit für die hier untersuchte Brauerei ein Gesamtnutzwärmeverbrauch von rund 6.000 kWh, welches bei dem angeführten Jahresnutzungsgrad des Dampferzeugers einem Endenergiebedarf von knapp 8.600 kWh entspricht.

Abfüllung

Im untersuchten Betrieb wird das hergestellte Bier sowohl in Flaschen als auch in Fässer abgefüllt. Hauptwärmeverbraucher sind dabei die entsprechenden Reinigungsanlagen.

Die Flaschenwaschmaschine wird mit zwei Laugenbädern mit 80 °C bzw. 72 °C betrieben. Die notwendige Laugentemperatur wird mittels einer Dampfheizung sichergestellt. Bei der maximalen Laugentemperatur von 80 °C wird nach Herstellerangaben beim Betrieb der Anlage ein spezifischer Dampfbedarf von 20,5 kg/1.000 Flaschen erforderlich. Bei einem Bierausstoß der Brauerei von rund 70.000 hl und einem Flaschenbieranteil von 56 % ergeben sich, unter der Berücksichtigung eines Anteils von einem Drittel der 0,5 l Flasche gegenüber zwei Drittel der 0,33 l Flasche, insgesamt 9,4 Mio. Flaschen pro Jahr, die die Reinigungsmaschine durchlaufen. Dadurch berechnet sich der Dampfbedarf für den Betrieb der Flaschenwaschmaschine auf 192,7 t/a, welcher einem Nutzenergiebedarf bei der zugrunde gelegten spezifischen Verdampfungsenthalpie von 2.014,5 kJ/kg von etwa 107.900 kWh entspricht.

Des weiteren fällt ein Wärmebedarf für das Aufheizen der Lauge zu Betriebsbeginn der Waschmaschine an. Für das einmalige Aufheizen der Lauge von 12 auf 80 °C werden nach Herstellerangaben etwa 1.549 kg Dampf benötigt. Da die Brauerei im Sommer durchschnittlich an fünf Tagen in 2 Wochen und im Winter an 3 Tagen in 2 Wochen abfüllt und jeweils in

einschichtigem Betrieb gearbeitet wird, können insgesamt etwa 104 Aufheizprozesse zugrunde gelegt werden. Der daraus folgende Dampfbedarf von etwa 161 t ergibt einen Nutzwärmeverbrauch von 90.200 kWh.

Der ebenfalls der Flaschenwaschmaschine angegliederte Kastenwäscher hat keinen Wärmeenergiebedarf, da der Betrieb mit warmem Wasser über den Ablauf der Waschmaschine erfolgt.

Die zweite Abfüllanlage ist die sog. Keg-Anlage, wobei Fässer unterschiedlicher Größen abgefüllt werden. Nach Herstellerangaben werden für die notwendigen Reinigungsvorgänge je 50 l Faß 10 Liter warmes Wasser, 300 g Dampf für die Sterilisation sowie 500 g Dampf für die Beheizung benötigt. Bei einem Faßbieranteil von 44 % der gesamten Abfüllkapazität werden demnach 30.800 hl Bier in Fässer gefüllt, welches unter der Annahme einer ausschließlichen Verwendung von 50 l Kegs insgesamt 61.600 Fässern entspricht. Der Nutzenergiebedarf für die Wassererwärmung (von 11 auf 80 °C) beläuft sich damit auf 49.470 kWh. Der Dampfbedarf für die Beheizung im Betrieb der Keg-Anlage beläuft sich auf 30,8 t, der für die Sterilisation der Fässer auf 18,5 t Dampf, so daß hierfür ein Nutzenergiebedarf von zusammen 27.580 kWh im angegebenen Bilanzjahr besteht.

Neben dem Wärmebedarf für den Betrieb der Reinigungsanlagen werden aus hygienischen Gründen sowohl die Flaschenabfüllanlage als auch die Kegabfüllung vor der jeweiligen Inbetriebnahme sterilisiert. Der benötigte Dampfbedarf berechnet sich dabei aus dem angegebenen Kondensatverlust bzw. dem Dampfkreislauf zugeführten Zusatzwassers abzüglich dem Dampfbedarf für den Betrieb der Keg-Anlage (direkter Dampfeinsatz). Bei einem Zusatzwassereinsatz von 788 m³ entfallen auf die Sterilisationsprozesse insgesamt 738,7 t Dampf. Unter der Berücksichtigung unterschiedlicher Sterilisationszeiten und Anlagengrößen kann nach Brauereiangaben der verbleibende Dampfverbrauch zu 1/4 der Sterilisation der Keg-Anlage und zu 3/4 der Sterilisation der Flaschenabfüllanlage zugeordnet werden. Damit ergibt sich ein Nutzwärmebedarf von 103.500 kWh bzw. 310.000 kWh.

Zusammenfassend ergibt sich somit für den gesamten Bereich der Abfüllung insgesamt ein Nutzwärmebedarf von rund 689.000 kWh. Bei dem angegebenen Jahres-Nutzungsgrad der Wärmebereitstellung von 70 % berechnet sich der Endenergieverbrauch letztendlich zu 1,19 Mio. kWh welches einem Anteil von 37,7 % am gesamten Brennstoffbezug ergibt.

2.3.2 Raumwärme

Der Bereich Raumwärme ist eher von untergeordneter Bedeutung. Zum einen wird ein Großteil der benötigten Raumwärme in der Brauerei durch Konvektion an den Produktionsanlagen (Sudhaus, Abfüllung) übertragen, zum anderen weisen die angegliederten Gebäude (z.B. Verwaltungsgebäude, Wohnhäuser) eine eigene Wärmeversorgung mittels dezentraler Heizkessel auf.

Die derzeitige Raumwärmeversorgung im untersuchten Betrieb gliedert sich in zwei Teilbereiche. In den Betriebshallen, die einer Wärmeversorgung bedürfen, werden dampfbeheizte Lüfter eingesetzt. Die Verwaltungsräume (Versand, Labor etc.) werden durch Radiatoren beheizt, wobei ein Wärmeübertrager die Systemtrennung zwischen dem Dampf und dem Heißwasser für die Heizungsanlage gewährleistet. Im Empfangsraum der Brauerei für Besuchergruppen erfolgt die Raumwärmeversorgung durch eine Fußbodenheizung.

Da keine UntergruppENZähler für die Erfassung des Raumwärmebedarfs in der untersuchten Brauerei installiert sind und da zudem von einer allgemein durchschnittlichen Bausubstanz ausgegangen werden kann, wird für die Wärmebilanzierung der Raumwärmebedarf des Branchendurchschnitts angesetzt (2,1 kWh/hl). Demnach liegt der Nutzenergiebedarf im Bilanzjahr 1998 bei 147.000 kWh und der Endenergiebedarf 210.000 kWh. Dies entspricht in etwa 6,7 % des gesamten Endenergiebedarfs.

2.3.3 Brauchwarmwasser

Für den Bereich der Brauchwarmwassergestehung gilt wie für die Raumwärmeversorgung, daß keine separate Erfassung der Verbrauchsdaten erfolgt. Daher wird auf durchschnittliche Vergleichszahlen für Bürogebäude zurückgegriffen, wonach je Person ein mittlerer Warmwasserbedarf von 10 l/d besteht [23]. Unter der Annahme, daß in etwa 50 Personen (internes Personal und Besucher) angesetzt werden können, ergibt sich bei 250 Tagen im Jahr ein Wasserbedarf von 125 m³. Wird dieses Wasser von 11 auf 60 °C erwärmt, liegt ein Nutzenergiebedarf von 7.130 kWh bzw. ein Endenergiebedarf von rund 10.200 kWh (0,3 % des gesamten Endenergiebedarfs) vor.

2.3.4 Kraft

Kälte

Die Hauptverbrauchsstelle im Bereich elektrischer Antriebe liegt für Brauereien im Bereich der Kälteerzeugung. Die hier untersuchte Brauerei betreibt zur Bereitstellung der erforderlichen Prozeßkälte zwei baugleiche Kältestationen. Die Kälteanlage A wird zum Kühlen der Würze auf die gewünschte Anstelltemperatur genutzt, die Kälteanlage B wird für die Kühlung im Bereich des Gär- und Lagerkellers eingesetzt.

Die Kälteleistung der Kälteanlage A beträgt insgesamt 90 kW und verteilt sich auf zwei baugleiche Kolbenverdichter, mit einer elektrischen Antriebsleistungen von jeweils 18,5 kW. Die elektrische Leistungsziffer berechnet sich somit zu 2,4. Unter der Annahme, daß pro Sud etwa 111 hl Würze von 12 °C auf die Anstelltemperatur von 7 °C abgekühlt werden, bedeutet dies einen Wärmeentzug von 64,6 kWh/Sud bzw. bei durchschnittlich 666 Suden pro Jahr rund 43.000 kWh/a. Die Wärme wird dabei im Würzekühler an das Eiswasser überführt, welches durch die Kältemaschinen zurückgekühlt wird. Wird im gesamten Kältekreislauf von

durchschnittlichen Verteilungsverlusten von 40 % ausgegangen, beträgt die Summe der aufzubringenden Kältearbeit ca. 60.200 kWh. Die zu ermittelnde elektrische Arbeit berechnet sich dabei aus der Kältearbeit sowie der Leistungsziffer der Kälteanlage, so daß sich ein Stromverbrauch für die Kälteanlage von rund 24.800 kWh ergibt. Um den Kältekreislauf aufrecht zu erhalten sind Pumpen bzw. sonstige Antriebe notwendig. Der hierfür benötigte Stromverbrauch liegt in etwa in der gleichen Größenordnung wie der für den Betrieb der Kälteanlage. Hinzu kommt ein Stromverbrauch für den Betrieb des Rückkühlwerkes, der mit einem Aufschlag von 25 % des Strombedarfes für die Kälteerzeugung veranschlagt wird. Das heißt, daß für die Kälteanlage A insgesamt ein Stromverbrauch von rund 55.800 kWh angesetzt werden kann.

Der Kältebedarf, der dem Gär- und Lagerkeller zuzuordnen ist (Kälteanlage B), fällt zum einen aufgrund der abzuführenden Wärme, die durch den Gärprozeß entsteht, sowie durch ein anschließendes Abkühlen der Würze an. Die zugesetzte Hefe vergärt in der untersuchten Brauerei im Mittel etwa 1,5 kg Extrakt/ hl, d.h. daß bei einer spezifischen Wärmeentwicklung von 586 kJ pro kg vergorenes Extrakt und bei einem mittleren Bierausstoß von 70.000 hl in etwa 17.100 kWh Gärwärme pro Jahr anfallen. Des weiteren findet eine Abkühlung des Jungbieres von der Gärtemperatur von 10°C auf die Lagertemperatur von 0°C statt, wobei für 111 hl etwa 130 kWh/Sud an Kältearbeit benötigt werden. Demzufolge liegt die erforderliche Kältearbeit für die Überbrückung der Temperaturdifferenz bei 666 Suden pro Jahr bei rund 86.000 kWh.

Neben der produktspezifischen Kühlung erfolgt ebenfalls über die Kälteanlage B eine Raumkühlung des Vollgut- und Drucktankraumes. Die Berechnung des Kältebedarfes für die Raumkühlung erfolgt nach Gl. 2.2,

$$Q = k \cdot A \cdot \Delta T . \quad (2.2)$$

Der Wärmedurchgangskoeffizient wird mit 0,46 W/m² K angenommen [5], die Wand bzw. Dachflächen addieren sich zu einer Fläche von insgesamt 180 m² und die zugrundegelegte Temperaturdifferenz ergibt sich aus der mittleren Jahrestemperatur von 6,2°C (nach VDI-Richtlinie 2067 [13], für die Stadt Kassel) und der einzuhaltenden Kühltemperatur von 0°C. Demzufolge berechnet sich der Kältebedarf für die Raumkühlung der Drucktanks auf 4.500 kWh.

Wird der Kältebedarf für die Abfuhr der Gärwärme, der Bedarf zur Abkühlung des Jungbieres auf die Lagertemperatur von 0 °C und der zuletzt angeführte Kältebedarf für Raumkühlung zusammengezogen und ein Verteilungsverlust von 40 % berücksichtigt ergibt sich eine erforderliche Kältearbeit von 150.700 kWh.

Diese Kältearbeit wird durch die Kälteanlage B bereitgestellt, die ebenfalls aus zwei baugleichen Kompressionsanlagen besteht, welche jeweils mit einer elektrischen Antriebsleistung von 18,5 kW eine Kälteleistung von 50 kW aufbringen. Wie schon bei der Kälteanlage A wird hierbei ebenfalls ein Kältespeicher (Solespeicher) eingesetzt, so daß, unter der Annahme

eines optimalen Betriebsverhältnisses, der elektrische Stromverbrauch mit Hilfe der Leistungsziffer von 2,7 auf der Basis des ermittelten Kältebedarfes berechnet wird. Somit ergibt sich für den Antrieb der Kältemaschinen für den Gär- und Lagerkeller ein elektrischer Stromverbrauch von 55.800 kWh/a.

Wie schon bei der Kälteanlage A kann weiterhin mit einem Stromverbrauch für Pumpen, Hilfsantriebe etc. gerechnet werden der in etwa in der gleichen Größenordnung wie der Strombedarf für den Antrieb der Kältekompressoren liegt. Der Strombedarf für das Rückkühlwerk kann wiederum mit etwa 25 % des Stromverbrauchs für die Kälteerzeugung angenommen werden. Daher wird insgesamt ein jährlicher Stromverbrauch von 125.600 kWh angesetzt.

Zusammengenommen erfordert der Kälteeinsatz in der Brauerei einen Endenergiebedarf von 181.350 kWh, welches einem Anteil von 20,4 % des gesamten Stromverbrauchs entspricht.

Abfüllung

Der nächstgrößte Stromverbrauchsbereich ist die Abfüllung. Für eine strukturierte Zuweisung des Stromverbrauchs auf einzelnen Verbrauchsbereiche wird die Angabe von branchenüblichen Kennzahlen zu Hilfe genommen, da differenzierten Stromverbrauchsmessungen aufgrund fehlender separater Unterzähler nicht möglich sind. Explizit ausgewiesen werden demnach der Stromverbrauch für die Flaschenwaschmaschine (0,42 kWh/hl) sowie für die Keg-Abfüllung (0,25 kWh/hl). Unter der Berücksichtigung, daß der gesamte Bierausstoß von 70.000 hl zu 56 % über Flaschen und zu 44 % über Kegs erfolgt, berechnet sich der Stromverbrauch für die Flaschenwaschmaschine im Bilanzjahr 1998 in etwa zu 12.950 kWh und der der Keg-Abfüllung zu 9.800 kWh.

Für die gesamte Flaschenabfüllung wird ein mittlerer Stromkennwert von 1,91 kWh/hl angegeben, wodurch sich ein Stromverbrauch von 58.800 kWh ermitteln läßt. Der gesamte Stromverbrauch für den Bereich Abfüllung summiert sich somit zu rund 81.500 kWh bzw. 9,2 % des gesamten Stromverbrauchs.

Gär- und Lagerkeller/Filtration

Der Strombedarf im Gär- und Lagerkeller bzw. für die Filterung des Bieres erstreckt sich im wesentlichen auf den Betrieb von Pumpen und sonstigen Hilfsantrieben. Für den Durchfluß des Bieres vom Sudhaus durch den Würzekühler in den Gärkeller kann in etwa ein Stromverbrauch von 7.000 kWh angesetzt werden. Auf die elektrischen Antriebe im Bereich des Gär- und Lagerkellers (z.B. für das Umpumpen des Jungbieres aus den Gär- in die Lager-tanks) entfällt ein Stromverbrauch von 44.100 kWh. Mit dem Strombedarf für den Bereich der Filterung sowie dem anschließenden Transport in die der Abfüllung vorgeschalteten Druck-

tanks von 24.500 kWh ergibt sich für den Gär- und Lagerkeller ein Anteil am gesamten Stromverbrauch von 7,7 %.

Sudhaus

Im Sudhaus werden elektrische Antriebe neben den oben beschriebenen Transportprozessen für den Betrieb von Rühr- und Schneidwerken eingesetzt. Unter der Annahme eines Strombedarfes von 0,65 kWh/hl ergibt sich ein spezifischer Stromverbrauch von 68,25 kWh/Sud und bei 666 Suden im Jahr 1998 ein Gesamtstromverbrauch im Sudhaus von rund 45.500 kWh (5,1 %).

Schroterei

Hauptverbraucher in der Schroterei ist der Antrieb der Schrotmühle. Da das Mahlwerk für eine Kapazität von 1.500 kg/h ausgelegt ist und in etwa 1.800 kg Malz pro Sud geschrotet wird, ergibt sich eine Laufzeit der Schrotmühle je Sud von 1,2 h. Die mittlere Leistungsaufnahme der Schrotmühle beträgt 6,15 kW. Das heißt, daß bei 666 Suden ein Stromverbrauch von rund 5.000 kWh auf die Mühle entfällt.

Des weiteren benötigen die übrigen Antriebe der Schroterei in etwa weitere 16.000 kWh Strom im Jahr, so daß der Bereich Schroterei mit etwa 2,4 % am Gesamtstromverbrauch beteiligt ist.

Nebenanlagen

Unter Nebenanlagen sind die technischen Einrichtungen zusammengefaßt, die nicht direkt dem Produktionsprozeß zugeordnet werden, sondern die als Hilfseinrichtungen zu verstehen sind und zudem für verschiedene Produktionsbereiche die jeweilige Funktion bereitstellen. Die Druckluft z.B. wird als Transporthilfe (pneumatische Fördereinrichtungen), zu Steuerungszwecken oder zum Ausgleich unterschiedlicher Druckstufen (Abfüllung) verwendet. Das heißt, die jeweilige Funktion wird produktionsbereichsübergreifend eingesetzt und daher separat ausgewiesen.

Mit jeweils 7,5 % des Gesamtstromverbrauchs (66.500 kWh) liegt der größte Verbrauchsanteil der Nebenanlagen in der Wasserver- bzw. -entsorgung. Der Druckluftversorgung sowie dem Kesselhaus wird jeweils im Bilanzjahr 1998 einen Stromverbrauch von 52.500 kWh (5,9 %) zugeordnet. Mit dem Stromverbrauch der Reinigungsanlage (CIP-Anlage) ergibt sich für die Nebenanlage ein summierter Verbrauch von rund 280.000 kWh. Der Anteil am Gesamtverbrauch liegt bei 31,5 %.

2.3.5 Beleuchtung

Der Gesamtenergiebedarf für die Beleuchtung beträgt ca. 53.000 kWh pro Jahr. Dies entspricht in etwa einem Anteil von 6 % am gesamten Strombedarf. Dabei entfallen in etwa drei Viertel des Stromverbrauchs für Beleuchtung auf die Produktionshallen sowie das Lager, das restliche Viertel verteilt sich auf Büros, Sozialräume sowie die Beleuchtung der Außenanlagen.

Im gesamten Betrieb kommen vorwiegend zwei Leuchtenarten zum Einsatz. In den Büros, im Labor sowie im Sudhaus sind Spiegelrasterleuchten installiert, die jeweils mit Leuchtstofflampen mit einer Länge von 0,59 m (Lampenleistung inkl. Vorschaltgerät 28 W) bestückt sind. Im übrigen Betrieb sind einlampige Wannenleuchten mit Kunststoffabdeckung angebracht. Die Leistungsaufnahme der hier verwendeten Leuchtstofflampen beträgt inkl. Vorschaltgerät 71 W.

Tageslichtabhängige Lichtmanagement-Systeme existieren nicht, allerdings ist eine Abschaltautomatik für die Beleuchtung im Sudhaus installiert. Mit rund 2,2 kW installierter Leistung ist das Sudhaus mit der höchsten Beleuchtungsleistung versehen. Aufgrund von Besucherführungen ist eine überdurchschnittliche Beleuchtung im Kernbereich der Brauerei durchaus erwünscht. Um eine übermäßige Beleuchtung während der normalen Betriebszeiten zu vermeiden und somit den Stromverbrauch zu reduzieren, wird zwei Drittel der Beleuchtung im Sudhaus automatisch nach 15 Minuten abgeschaltet.

2.3.6 Kommunikation

Der Gesamtenergiebedarf für die Kommunikation beträgt in etwa 18.900 kWh pro Jahr. Dies entspricht einem Anteil von rund 2 % des gesamten Stromverbrauchs. Im Unternehmen sind 8 Rechnerarbeitsplätze mit entsprechenden Monitoren sowie Ausgabegeräten untergebracht. Des Weiteren wird Strom für Kopiergeräte, die Telefonanlage oder Faxgeräte benötigt.

2.4 Abbildung des Ist-Zustandes im Bereich der Schadstoffemission

Der Einsatz von Endenergie ist i.d.R. mit der Emission von Luftschadstoffen gleichzusetzen. Zu unterscheiden sind dabei einerseits Luftschadstoffe, die durch Verwendung von Brennstoffen in Feuerungsanlagen zur betrieblichen Wärmeversorgung direkt beim Verbraucher freigesetzt werden und andererseits Emissionen, die nicht am Ort des Energieverbrauchs entstehen, sondern in vorgelagerten Prozessen freigesetzt werden. Bei den hier zum Einsatz kommenden Energieträgern Erdgas und Heizöl treten bspw. Emissionen, die zu den vorgelagerten Prozessen gezählt werden, für die Exploration der Primärenergieträger sowie die Aufbereitung bzw. Umwandlung und den Transport auf.

Beim Strom hingegen treten am Ort des Verbrauchs keine Emissionen auf. Die entstehenden (vorgelagerten) Luftschadstoffe fallen hier im wesentlichen in Kraftwerken an, da die Stromerzeugung zumeist mit der Umwandlung von Brennstoffen verbunden ist.

Die Abschätzung der relevanten Emissionsfaktoren beruht auf Ergebnissen, die auf der Grundlage des Programmsystems "GEMIS" und ergänzenden Untersuchungen gewonnen wurden [5, 6]. Für die Erstellung der betrieblichen Emissionsbilanz wird auf spezifische Emissionsfaktoren [kg/kWh] für den jeweiligen Energieträger zurückgegriffen. Dabei werden für die im Unternehmen verwendeten Endenergien Erdgas, Heizöl und Strom die wichtigsten relevanten Luftschadstoffe Kohlendioxid CO₂, Kohlenmonoxid CO, Schwefeldioxid SO₂, Stickoxide NO_x, flüchtige "nichtmethanhaltige, organische Kohlenwasserstoffe" (NMVOC) und Staub, die sowohl bei der direkten thermischen Nutzung im Betrieb entstehen (Erdgas, Heizöl), als auch die Emissionen, die in vorgelagerten Prozessen freigesetzt werden, berücksichtigt. In Tabelle 2.1 sind die Ergebnisse der Schadstoffberechnung zusammengefaßt.

Tabelle 2.1 Ergebnisse der Schadstoffberechnungen des Betriebes

Schadstoff	jährliche Schadstoffemissionen		
	im Betrieb	vorgelagert	Gesamt
	[t/a]		
CO ₂	592	746	1.338
	[kg/a]		
CO	293	175	468
SO ₂	338	453	790
NO _x	346	628	974
NMVOC	55	59	114
Staub	5	72	77

In der Gesamtbilanz der jährlichen Schadstoffemissionen ist CO₂ mengenmäßig der bedeutendste Luftschadstoff. Durch den Endenergiebedarf von rund 3,44 Mio. kWh setzt der Betrieb 1998 rund 1.460 t CO₂ frei, wobei die Schadstoffe jeweils zur Hälfte direkt durch das Unternehmen bzw. durch entsprechend vorgelagerte Prozesse emittiert werden. Die Aufteilung direkter sowie indirekter Emissionen beim CO₂ sowie bei den übrigen erfaßten Luftschadstoffen verdeutlicht Abbildung 2.8.

Die nächstgrößte Schadstoffgruppe ist mit einem Ausstoß von rund 1 t die Gruppe der Stickoxide, gefolgt vom Schwefeldioxid mit etwa 800 kg. Für beide Luftschadstoffe gilt, daß etwa 40 % der jeweiligen Schadstoffmenge direkt beim Verbraucher, also durch die Verbrennung des eingesetzten Erdgases bzw. Heizöls entstehen und die restlichen 60 % u.a. durch Le-

ckagen bei der Förderung des Primärenergieträgers bzw. durch den Transport oder durch Reinigungs- und Umwandlungsprozesse freigesetzt werden (vgl. Abbildung 2.8).

Bei der Betrachtung des Luftschadstoffes „Kohlenmonoxid“ (560 kg Ausstoß im Jahr 1998), wird deutlich, daß im Gegensatz zu den bisher angesprochenen Emissionen mit etwa zwei Drittel der Hauptanteil beim Verbraucher entsteht. Da Kohlenmonoxid vorwiegend durch einen unvollständigen Verbrennungsprozeß entsteht, sind diese Emissionen durch die feuerungstechnische Umsetzung der Brennstoffe Erdgas und Heizöl im Betrieb zu begründen.

Hinsichtlich der Zuordnung der Staubemissionen zeigt Abbildung 2.8 mit rund 95 % einen überwiegenden Anteil im Bereich der vorgelagerten Prozesse. Staub wird im wesentlichen durch die Verbrennung von Braun- oder Steinkohle emittiert, so daß die hier aufgeführten -ohnehin relativ geringen- Staubemissionen überwiegend auf den Strombezug zurückzuführen sind (bei der Berechnung der Schadstoffemissionen zugrundegelegten westdeutschen Stromproduktion werden zu einem großen Anteil Stein- bzw. Braunkohlen eingesetzt).

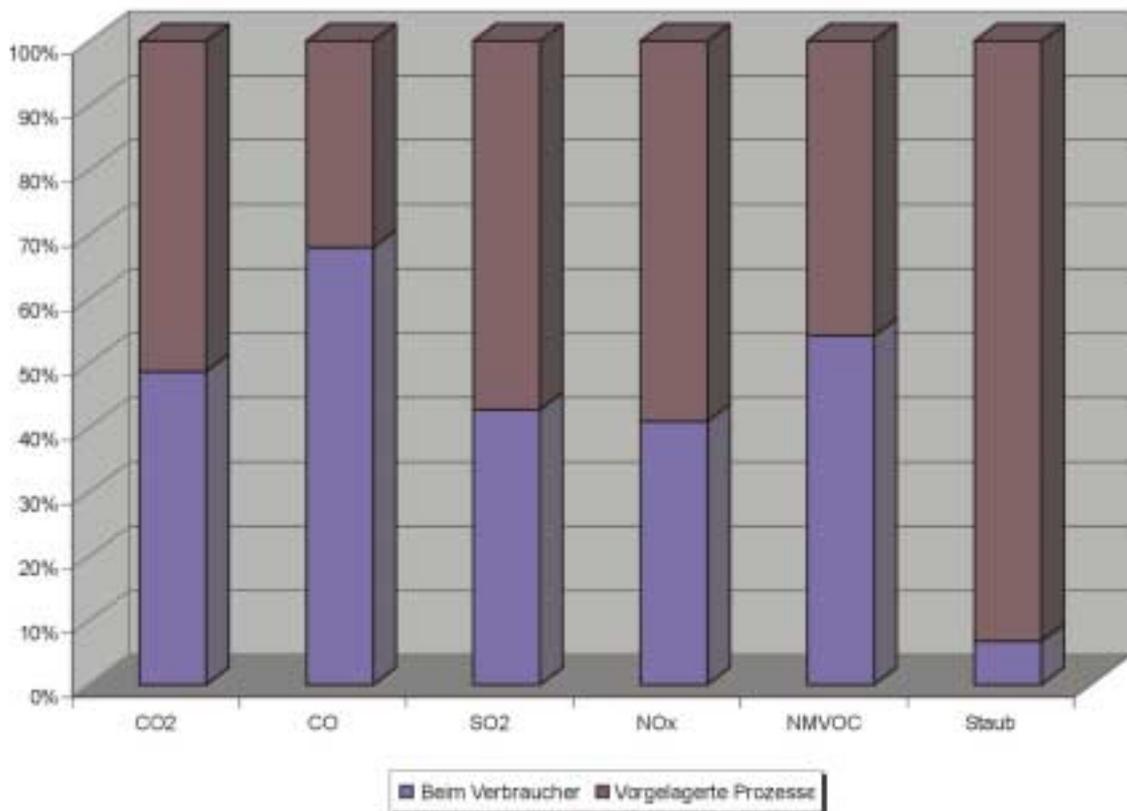


Abbildung 2.8 Verteilung der vorgelagerten und betrieblichen Schadstoffemissionen für die verschiedenen Luftschadstoffe

Ferner wird deutlich, daß die verschiedenen Brennstoffe sehr unterschiedliche Anteile an den verschiedenen Schadstoffkomponenten bewirken. Die jeweiligen Anteile, die aus dem

Einsatz der Energieträger im untersuchten Betrieb resultieren, sind in Abbildung 2.9 zusammengestellt. Hierbei ist der angesprochene Zusammenhang zwischen den Staubemissionen und der Stromproduktion zu erkennen. Etwa 80 % der gesamten Staubemissionen werden bei der Stromerzeugung freigesetzt. Obwohl der Strom an der betrieblichen Energieversorgung nur einen Verbrauchsanteil von 22 % aufweist, verdeutlicht Abbildung 2.9 den überproportionalen Einfluß der durch den Stromverbrauch bedingten Emissionen. Hierbei kommt der deutlich geringere Wirkungsgrad der Stromerzeugung im Vergleich zum Wirkungsgrad bei der Verbrennung der im Betrieb zur Wärmeerzeugung eingesetzten Brennstoffe Erdgas und Heizöl zum tragen. Bei dem Einsatz von Erdgas ist der hohe Emissionsanteil von etwa 50 % beim Schadstoff Kohlenmonoxid zu erwähnen, wohingegen beim Schwefeldioxid und beim Staubaustoß das Erdgas nur eine untergeordnete Rolle spielt. Insbesondere bei der Emission von Schwefeldioxid entfällt auf den Energieträger Heizöl mit über 50 % ein vergleichsweise hoher Anteil der gesamten SO₂-Emissionen.

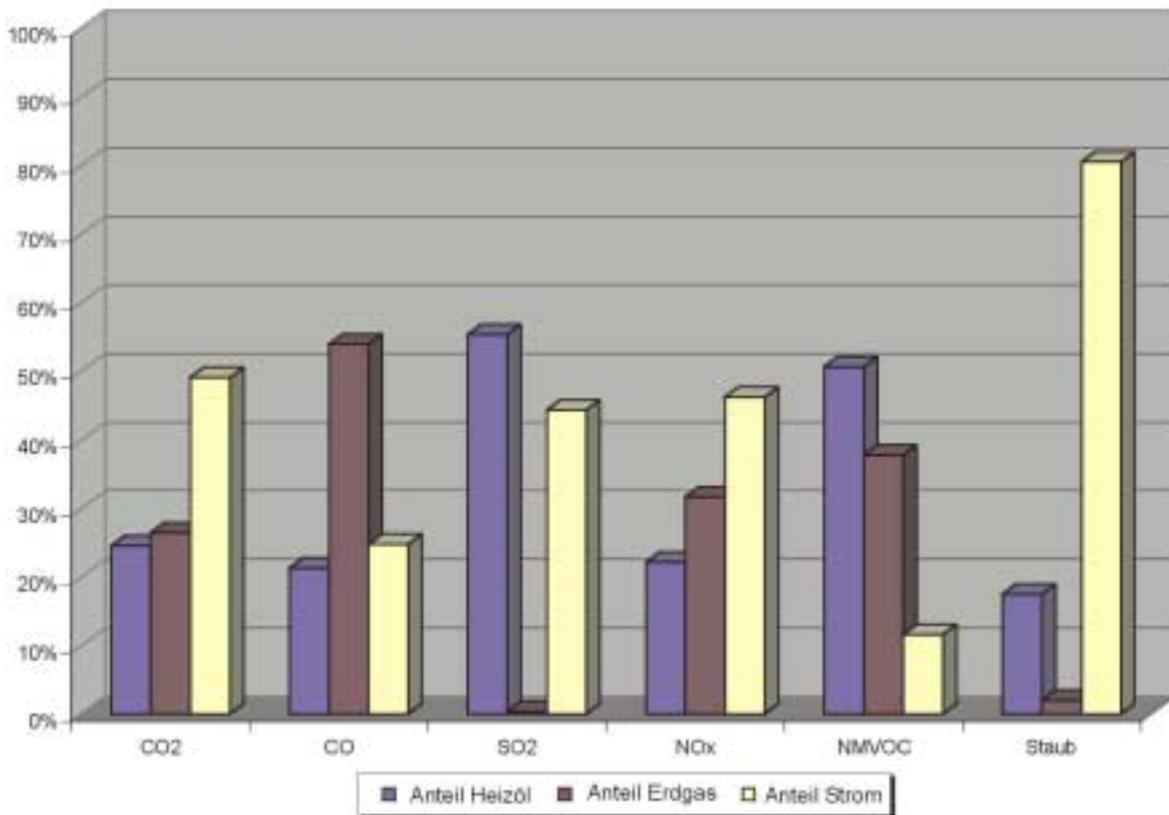


Abbildung 2.9 Prozentuale Verteilung der Schadstoffemissionen auf die verwendeten Endenergieträger

2.5 Zusammenfassende Darstellung der energetischen Situation

Der Endenergiebedarf des untersuchten Betriebes betrug im zugrunde gelegten Bilanzjahr 1998 rund 3,44 Mio. kWh, wovon etwa 1,3 Mio. kWh auf den Energieträger Erdgas und 1,25 Mio. kWh auf den Energieträger Heizöl EL entfielen. Der Strombedarf des Unternehmens lag 1998 bei 0,89 Mio. kWh.

Die Brennstoffe Erdgas und Heizöl werden in einem Großwasserraumkessel zur Gesteuerung von Prozeßwärme (Niederdruckdampf) sowie zur Raumwärme- und Brauchwarmwasserversorgung der Produktions- und Bürobereiche eingesetzt. Den größten Anteil am thermischen Energieverbrauch nimmt die Prozeßwärme mit ca. 25,3 % ein. Die Raumwärme hat mit rund 6 % einen eher geringen Anteil am gesamten Wärmebedarf des Unternehmens. Die Brauchwarmwasserversorgung ist mit einem Anteil von 0,3 % dagegen zu vernachlässigen.

Der Bedarf an elektrischen Strom wird vollständig über das öffentliche Netz gedeckt. Eine Eigenstromerzeugung wird nicht durchgeführt. Mit einem Anteil von rund 93 % am gesamten Stromverbrauch konnte der Kraftbereich als größter Verbrauchssektor identifiziert werden. Der Anteil der Beleuchtung beträgt etwa 5 % und auf den Bereich der Kommunikation entfallen ca. 2 %.

3 Erarbeitung von Maßnahmen zur Energieeinsparung und rationellen Energienutzung

Basierend auf der in Kapitel 3 durchgeführten Analyse der betrieblichen Energiebereitstellung und -anwendung werden im folgenden verschiedene Ansätze zur Optimierung der bestehenden Energieversorgung erarbeitet und diskutiert. Die Darstellung der einzelnen Maßnahmen erfolgt dabei analog zu den vorhergehenden Kapiteln getrennt für die verschiedenen Anwendungsbereiche.

Konzepte für eine rationelle Energienutzung lassen sich prinzipiell den dargestellten Punkten des nachfolgenden Maßnahmenkataloges zuordnen (vgl. hierzu [8])

- Vermeiden unnötigen Energieverbrauchs,
- Senken des derzeitigen Nutzenergiebedarfs,
- Verbesserung der Wirkungs- bzw. Nutzungsgrade bei der Energieversorgung,
- betriebliche Energierückgewinnung und
- Einsatz innovativer und regenerativer Energien bzw. Energietechniken.

Dabei bewertet die oben genannte Reihenfolge die verschiedenen Maßnahmenbündel insofern, als daß der technische und finanzielle Aufwand mit der obigen Reihenfolge anwächst [8]. Im Sinne einer wirtschaftlichen Energieeinsparung bzw. rationellen Energienutzung sollten daher zunächst alle Möglichkeiten zur Vermeidung unnötigen Energieeinsatzes bzw. zur Minderung des Nutzenergiebedarfes ausgeschöpft werden. Beispiele hierzu sind die Absenkung unnötig hoher Prozeßtemperaturen oder aber die Druckminderung der betrieblichen Druckluftversorgung. Entsprechende Maßnahmen erfordern oftmals keine Investitionen bzw. bauliche Maßnahmen, da allein die Überprüfung der derzeitigen Energienutzung, die Information und Sensibilisierung der Mitarbeiter oder aber organisatorische Maßnahmen erhebliche Verbesserungen bewirken können.

Im Rahmen der nachfolgenden Untersuchungen werden zunächst verschiedene Einzelmaßnahmen zur Energieeinsparung in den unterschiedlichen Energieanwendungsbereichen beschrieben sowie technisch, wirtschaftlich und ökonomisch bewertet. Das mögliche Energieeinsparpotential einer Maßnahme sowie die damit verbundene Emissionsminderung relevanter Luftschadstoffe, die auf dem verminderten Einsatz entsprechender Energieträger beruht, werden diskutiert. Basierend auf einer Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse aus der Analyse des Ist-Zustandes werden einzelne Optimierungsansätze erarbeitet. Hierbei erfolgt zunächst eine allgemeine Darstellung entsprechender technischer Möglichkeiten sowie darauf aufbauend die Auswahl eines konkreten Konzeptes.

Als die wesentlichen Kriterien zur Bewertung einer Investition aus betriebswirtschaftlicher Sicht gelten im allgemeinen die erforderlichen Gesamtinvestitionen sowie die Dauer der Kapitalbindung, d.h. letztlich der Zeitraum des Kapitalrückflusses. Zumeist erfolgt die Berechnung der Amortisationszeit der Einfachheit halber mit Hilfe der statischen Amortisationsrechnung nach Gleichung 3.1 durchgeführt.

Dabei bezeichnet n_s die statische Amortisationszeit, I_0 den Barwert einer Investition in [DM], R den Restwert der Investition nach Ablauf der Nutzungsdauer in [DM] und E die jährlichen Minderausgaben durch eine Energieeinsparung der Neuinvestition gegenüber einer vorhandenen Anlage in [DM/a]. Der Faktor $0,08 \cdot I_0$ beschreibt einen jährlichen Kostensatz, der den Kapitaleinsatz, Personal- und Wartungskosten beschreibt und mit 8 % des Barwertes der Investition angesetzt ist:

$$n_s = \frac{I_0 - R}{E - (0,08 \cdot I_0)}. \quad (3.1)$$

Näherungsbetrachtungen sind häufig mit erheblichen Ungenauigkeiten behaftet und können auch unterschiedliche Finanzierungsmodelle (z.B. Eigen- oder Fremdfinanzierung) nicht bewerten, so daß die Wirtschaftlichkeit einer vorgeschlagenen Maßnahme ferner auch anhand einer dynamischen Amortisationszeit bewertet wird, die sich nach Gleichung 3.2 errechnet. Dabei bezeichnet g die jährlichen Kosteneinsparungen einer Maßnahme in [DM/a], I_0 den Barwert der Investitionskosten in [DM], i^* den inflationsbereinigten Zinssatz in [%] und n_D die dynamische Amortisationszeit in [a]:

$$n_D = \frac{\ln\left(1 / \left(1 - \frac{i^* \cdot I_0}{g}\right)\right)}{\ln(1 + i^*)}. \quad (3.2)$$

Der inflationsbereinigte Zinssatz i^* bestimmt sich unter Berücksichtigung einer jährlichen Preissteigerungsrate r zu:

$$i^* = \frac{(1 + i)}{(1 + r)} - 1. \quad (3.3)$$

Der kalkulatorische Zinsfluß i ist abhängig von den betrieblichen Randbedingungen und unterliegt ferner den Schwankungen des Kapitalmarktes. Die Berechnung der dynamischen Amortisationszeit wird im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen sowohl für eine Eigenfinanzierung als auch für eine Fremdfinanzierung, d.h. bei einer Kapitalaufnahme am Kreditmarkt, bestimmt. Beide Möglichkeiten sind somit Grenzbetrachtungen, da i.d.R. eine Mischfinanzierung erfolgt, wobei in diesem Fall die Ergebnisse zwischen den errechneten Ergebnissen der Eigen- bzw. Fremdfinanzierung liegen. Für die vollständige Eigenfinanzie-

zung wird ein Zinssatz von 5 % zugrunde gelegt, der dem unteren Zinsniveau einer langfristigen Geldanlage entspricht. Für eine vollständige Fremdfinanzierung wird angenommen, daß ein Kreditzins von rund 9 % bezahlt werden muß.

3.1 Prozeßwärme

Mit einem jährlichen Endenergieeinsatz von 1,8 Mio. kWh, welches einem Anteil von rund 62 % des gesamten Endenergiebedarfs entspricht, ist der Anwendungsbereich Prozeßwärme von zentraler Bedeutung im betrachteten Unternehmen. 37,8 % der Prozeßwärme werden im Sudhaus benötigt, etwa 31,4 % der Wärme findet im Bereich der Abfüllung Anwendung. Von eher untergeordneter Bedeutung ist dagegen mit 0,3 % der Prozeßwärmebedarf bei der Filtration.

Die Prozeßwärme wird durch einen wahlweise mit Erdgas bzw. Heizöl befeuerten Dampferzeuger in Form von Niederdruckdampf bereitgestellt.

Maßnahmen zur Vermeidung unnötigen Energieverbrauchs und zur Senkung des derzeitigen Nutzenergiebedarfes

Wirtschaftlich effektive Maßnahmen zur Reduktion des derzeitigen Wärmebedarfs im Anwendungsbereich „Prozeßwärme“ sind im betrachteten Unternehmen nicht auszumachen. Durch den Brauprozeß sind bestimmte Prozeßparameter (z.B. Einmischtemperatur, Wassermenge) notwendigerweise einzuhalten, so daß Energiereduktionen nur durch Verfahrensstellungen bzw. Austausch der Produktionsanlagen zu erreichen ist.

Hinsichtlich des Prozeßschrittes der Würzegewinnung (Maischen) sind unterschiedlichste Verfahren entwickelt worden. Das hier angewandte Infusionsmaisungsverfahren gilt bereits als ein energiesparendes Maischverfahren, da auf das energieintensive Kochen von Teilmaischen (vgl. Zweimaisch- oder Dreimaischverfahren) verzichtet wird und somit eine kontinuierliche Erwärmung der Maische (unter Einhaltung gewisser Temperaturrasten) auf maximal 80 °C durchgeführt wird. Die Wahl eines anderen Maischverfahrens kann somit hier nicht vorgeschlagen werden.

Möglichkeiten der Energiebedarfsreduzierung im Prozeßschritt „Würzekochen“ bestehen evtl. durch eine Umstellung auf die sog. „Niederdruckkochung“ oder „Hochtemperaturwürzekochung“. Das Ziel der Niederdruckkochung ist die Reduzierung des Energieverbrauchs durch Verminderung der Gesamtverdampfung bei höheren Kochtemperaturen. Die Kochtemperaturen liegen bei diesem Verfahren in etwa zwischen 104 und 110 °C. Im Gegensatz zur konventionellen Kochung mit einer Verdampfungsrate von mindestens 8 % wird eine Gesamtverdampfung bei der Niederdruckkochung von 3 bis 6 % als ausreichend betrachtet. Durch den verminderten Heizdampfbedarf ergeben sich Einsparungen von 46 bis 57 %, be-

zogen auf die konventionelle Kochung. Die Gesamtenergieeinsparung ist sogar noch höher anzusetzen, da bei geringerer Verdampfung auch weniger Brauwasser eingesetzt werden kann und somit weitere Energieeinsparungen bei den vorgelagerten Prozeßstufen Maischen und Aufheizen der Würze zum Tragen kommen. Auf eine konkrete Berechnung dieser Energieeinsparmaßnahme wird hier jedoch verzichtet, da zumeist viele alte Würzpfannen nicht auf diese Technologie umgerüstet werden können, weil sie nicht für den hier notwendigen Überdruck von 0,5 bar ausgelegt sind. Dieses trifft ebenfalls auf die im betrachteten Unternehmen eingesetzte Kupferwürzpfanne zu [4, 20-22].

Ein weiteres Verfahren zur Würzekochung stellt das Hochtemperaturwürzekochen dar. Hierbei können Energieeinsparungen von ca. 70 % erzielt werden. Auf dieses Verfahren wird hier im folgenden ebenfalls nicht näher eingegangen, da zum einen die gesamte Anlagentechnik auf dieses Kochverfahren abgestimmt werden muß und zum anderen die hohen Temperaturen die Bierqualität beeinflussen können. Insbesondere in kleinen Brauereien zählt die Bierqualität zu den Hauptverkaufsmerkmalen, so daß Produktionsverfahren, die evtl. Bierqualität vermindern können, nicht zur Diskussion anstehen.

Eine Reduzierung des derzeitigen Nutzenergiebedarfs könnte im untersuchten Betrieb auch durch den Austausch von Produktionsanlagen erreicht werden. Der Läuterbottich und die Würzpfanne sind jeweils im wesentlichen aus Kupfer gefertigt und besitzen keinerlei Wärmedämmung. Die auftretenden Wärmeverluste durch Transmission bzw. Strahlung können durch wärmegeämmte Gefäße vermindert und somit der benötigte Heizenergieverbrauch ebenfalls reduziert werden. Aufgrund des beträchtlichen Investitionsvolumens sowie des ideellen Wertes der kupfernen Gefäße (Imagegewinn unter dem Aspekt der traditionellen Bierherstellung) wird diese Einsparmöglichkeit nicht weiter erörtert.

Maßnahmen zur Verbesserung der Nutzungsgrade bei der Energieversorgung

Hinsichtlich der derzeitigen Energieversorgung, d.h. die Bereitstellung von Prozeßwärme durch den Energieträger Prozeßdampf, sind keine bedeutsamen Verbesserungen zu erzielen. Die Kesselanlage ist vor vier Jahren erneuert worden, so daß die durch einen Austausch des Dampferzeugers mögliche Steigerung des Kesselwirkungsgrades nicht die Energie- und somit Kosteneinsparung bewirken wird, daß sich die notwendigen Investitionen in einem wirtschaftlich sinnvollen Zeitrahmen amortisieren. Der derzeitige Jahresnutzungsgrad der Kesselanlage von 86 % liegt unter der Berücksichtigung eines ausgeprägten Teillastbetriebes (diskontinuierlicher Produktionsablauf) in einem üblichen Rahmen (vgl. [12]).

Der erwähnte diskontinuierlicher Produktionsablauf in Verbindung mit einer durchaus realistischen Schwankungsbreite von 60 - 80 % der thermischen Spitzenlast bietet äußerst schlechte Voraussetzungen für eine Eigenenergieerzeugung mittels Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). Der **Einsatz eines Blockheizkraftwerkes** zur gleichzeitigen Strom- und Wärmeversorgung für Teilbereiche des Betriebes scheint dennoch eine wirtschaftlich realisierbare Al-

ternative zu sein. Für den Fall, daß die technische Möglichkeit der Umrüstung der Flaschenwaschmaschine von Dampfbeheizung auf eine Erwärmung der Reinigungslaugen durch Heißwasser besteht, bietet sich die Abwärmenutzung aus dem Betrieb eines Motorheizkraftwerkes (MHKW) an.

Obwohl die Kraft-Wärme-Kopplung im Betrieb z.T. höhere Brennstoffeinsätze mit sich bringen kann, wird der Elektrizitätsbezug, der den zusätzlichen Brennstoffbedarf i.d.R. überkompensiert, reduziert. Die Notwendigkeit eines kontinuierlichen Wärmebedarfes ist durch den fortlaufenden Reinigungsprozeß der Flaschenwaschmaschine gegeben. Der Nachteil der relativ kurzen Jahresnutzungsdauer (einschichtiger Betrieb) wird zum einen durch die kostengünstige Umstellung des Wärmeträgers (von Dampf auf Heißwasser) sowie zum anderen durch eine Wärme- und Strombereitstellung, die über den eigentlichen Wärmebedarf der Flaschenwaschmaschine hinausgeht, teilweise ausgeglichen. Eine sog. „Überproduktion“ an Prozeßwärme zur Erhöhung des Eigenstromanteils kann z.T. an das Raumwärmeverversorgungssystem überführt werden oder zu Zeiten, in denen kein Heizenergiebedarf besteht, mittels Wärmeübertrager über das Rückkühlsystem der Kälteanlage abgeführt werden. Der evtl. zusätzliche Nutzen der „überschüssigen“ Wärme soll hierbei allerdings nicht berücksichtigt werden, so daß von einer eher konservativen Energie- bzw. Kosteneinsparungsabschätzung auszugehen ist.

Grundlage der Auslegung eines MHKW bildet der derzeitige Wärmebedarf der Flaschenwaschmaschine. Dieser teilt sich auf in einen Wärmebedarf zum Aufheizen der Maschine bzw. der Reinigungslaugen und in den Wärmebedarf für den Betrieb der Reinigungsmaschine. Um die thermische Leistung des geplanten MHKW bestimmen zu können, ist zunächst die Laufzeit der Waschmaschine zu ermitteln. Bei einer Abfüllung von 5 Tagen in zwei Wochen (Sommer) und 3 Tagen in zwei Wochen (Winter) sowie einer täglichen Laufzeit der Maschine von 6 Stunden (An- und Abfahrzeiten werden nicht berücksichtigt) ergibt sich eine durchschnittliche Laufzeit von 624 Stunden. Dies entspricht einer mittleren Reinigungsleistung der Maschine von 15.000 Flaschen pro Stunde (Nennleistung: 18.000 Flaschen pro Stunde). Der Wärmebedarf für den Betrieb der Flaschenwaschmaschine liegt bei rund 108.000 kWh/a, so daß durch eine Division mit den Benutzungsstunden sich eine durchschnittliche Wärmeleistung von ca. $172 \text{ kW}_{\text{th}}$ berechnet.

Die ermittelte Wärmeleistung dient als Orientierung für die Auslegung eines MHKW. Um ein wirtschaftliches Optimum zu spezifizieren, wird neben der Berücksichtigung unterschiedlicher Anlagengrößen (die spezifischen Investitionskosten sinken mit der Zunahme der Leistung der jeweiligen Aggregate) zudem der Einsatz von Erdgas oder Heizöl (unterschiedliche Brennstoffkosten sowie Stromkennzahlen der jeweiligen MHKW) zugrunde gelegt. Weiterhin wird hinsichtlich des Wärmebedarfes der Waschmaschine ebenfalls die Wärmemenge, die für die Aufheizphase (rund 89.500 kWh) benötigt wird, hinzugezogen. Für den Fall, daß die thermische Leistung des MHKWs unter der notwendigem Mindestleistung von $172 \text{ kW}_{\text{th}}$ liegen sollte, kann nicht die vollständige Wärmeversorgung durch das MHKW gewährleistet werden, sondern der restliche Wärmebedarf muß über die derzeitige Dampfversorgung bereitgestellt werden.

Eine weitere Restriktion bei der Anlagenplanung ist der Stromverbrauch des Unternehmens, wobei die jährliche Stromproduktion der KWK-Anlage den derzeitigen Stromverbrauch nicht überschreiten soll. Eine Rückspeisung des überschüssigen elektrischen Stroms ist zu vermeiden, da diese i.d.R. für den Anlagenbetreiber aufgrund geringer Einspeisevergütungen unwirtschaftlich ist [13-15]. Neben dem Stromverbrauch spielt der elektrische Leistungsbedarf des Betriebes eine Rolle. Aufgrund des Gesamtstromverbrauches von 889.000 kWh/a und der bezogenen Spitzenleistung von rund 280 kW kann bei der hier durchzuführenden Grobauslegung ein Leistungsbedarf von 100 kW (bei ca. 6.000 Vollbenutzungsstunden) durchaus als Grundlast und damit als „dauerhaft abnehmbar“ bezeichnet werden (Orientierungsgröße).

Zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit wurde für jede der 7 ausgelegten Varianten (4 Gas-Otto- und 3 Diesel-MHKW) der aktuelle spezifische Strompreis von 17,7 Pf/kWh sowie spezifische Brennstoffpreise von 2,9 Pf/kWh (Heizöl EL) bzw. 3,5 Pf/kWh (Erdgas) zugrunde gelegt. Der hier angesetzte Preis für den Bezug von Erdgas liegt unter den derzeitigen durchschnittlichen Bezugspreisen, da davon auszugehen ist, daß sich bei einem entsprechenden Mehrverbrauch auch die Gasbezugspreise nach unten entwickeln werden. Zur Berechnung der Kosteneinsparungen wird der derzeitige Endenergieverbrauchsmix von Heizöl und Erdgas zur Prozeßwärmegestehung insofern berücksichtigt, als daß die unterschiedlichen Brennstoffkosten, entsprechend ihrem jeweiligen Verbrauchsanteil, zur Ermittlung der jetzigen Kosten herangezogen werden. Demzufolge ergibt sich ein spezifischer Brennstoffkostenpreis von 3,61 Pf/kWh, der für die Angabe der Kosteneinsparungen durch den Energieminderverbrauch benötigt wird.

Wird die Systemgrenze für eingehende Endenergieströme um das zu untersuchende Unternehmen gelegt, kann für den Einsatz eines Blockheizkraftwerkes von keiner Energieeinsparung gesprochen werden. Vielmehr erhöht sich sogar der Bezug von Endenergie. Dies liegt darin begründet, daß sich der Ort der Stromerzeugung im angeführten Berechnungsbeispiel innerhalb der Systemgrenze, im derzeitigen Versorgungsfall jedoch außerhalb der Grenze, befindet. Das bedeutet, daß die bei der zentralen Stromgestehung frei werdende Abwärme nicht in der derzeitigen Energiebilanz aufgeführt ist. Wird hingegen eine Gesamtbetrachtung durchgeführt, liegt der Vorteil der dezentralen Stromerzeugung eben gerade in der Möglichkeit der Abwärmenutzung. Wird der Aspekt der vorgelagerten Prozeßketten mit hinzugezogen, ist die Energieeinsparung tendenziell anhand der Emissionsbilanz zu erkennen. Hierbei werden einerseits die Emissionen berücksichtigt, die am Ort der Energieumwandlung auftreten und andererseits zudem diejenigen, die im Vorfeld, das heißt von der Exploration über die Aufbereitung bis hin zum notwendigen Transport zur hier zugrunde gelegten Systemgrenze auftreten. Bei der bezogenen Endenergie Strom sind dies auch die Emissionen, die bei der Stromgestehung in zentralen Kraftwerken entstehen. Demzufolge ist die Emissionsbilanz, im Gegensatz zur Endenergiebilanz (an der Systemgrenze Brauerei) im allgemeinen positiv. Die negativen Werte beim CO und beim NOMVOC ergeben sich durch den unterschiedlichen Einsatz verschiedener Energieträger.

Der Leistungsbereich der ausgewählten Gas-Otto-MHKW erstreckt sich von 72 kW_{el} bis 143 kW_{el}. Das wirtschaftliche Optimum für den Einsatz eines MHKW ergibt sich aus einer möglichst langen Laufzeit (möglichst hohe Ausnutzung der gekoppelten Kraft- und Wärme-gestehung) und möglichst niedrigen Investitions- und Betriebskosten. Die spezifischen Investitionskosten reduzieren sich mit der Zunahme der Leistung der Aggregate. Die beiden gegenläufigen Tendenzen (lange Laufzeiten => kleines MHKW; niedrige Investitionskosten => großes MHKW) ergeben bei den hier untersuchten Gas-Otto-MHKW ein wirtschaftliches Optimum für ein MHKW mit einer elektrischen Leistung von 112 kW (Variante III). Für den Fall einer jährlichen Laufzeit von 6.000 Stunden liefert das MHKW mehr Wärme als die Waschmaschine benötigt. Die überschüssige Wärme kann evtl. im Brauprozess oder zur Raumwärmeversorgung genutzt werden, wird jedoch für die Berechnung der Kostenreduzierung nicht hinzugezogen, so daß von einer konservativen Kostenabschätzung ausgegangen werden kann. Der Vorteil der über den eigentlichen Wärmebedarf hinausgehenden Laufzeit ergibt sich durch die gleichzeitige Stromerzeugung, die zur Reduzierung des Strombezuges herangezogen wird (keine Netzeinspeisung).

Bei spezifischen Investitionskosten von 1.920 DM/kW_{el} für das 112 kW Modul ergibt sich ein Investitionsvolumen von rund 215.000 DM. Darin enthalten sind Kosten für einen eventuellen Gebäudeumbau, Kaminanlage, Verrohrung, Gasanschluß sowie für das MHKW selbst. Bei der erwähnten elektrischen Leistung von 112 kW ergibt sich eine jährliche Eigenstromerzeugung von 672.000 kWh, die mit 17,7 Pf/kWh bewertet eine Kostenreduzierung von 118.950 DM bewirkt. Eine weitere Einsparung in Höhe von 8.280 DM liegt in dem bisherigen Endenergiebedarf der Waschmaschine (Versorgung mit Prozeßdampf). Demgegenüber stehen neue Wärme-gestehungskosten (Brennstoff- und Betriebskosten für das MHKW) von jährlich 90.500 DM. Insgesamt ergeben sich somit in der Bilanzierung jährliche Kostenreduzierungen von 36.750 DM, so daß sich die Investitionsausgaben bei einer Eigenfinanzierung in etwa 6,6 Jahren und bei einer Fremdfinanzierung in 7,8 Jahren amortisieren.

Infolge der gleichzeitigen Nutzung von Wärme und Strom bei der dezentralen Stromerzeugung ergibt sich gegenüber der separaten Wärme- und Strom-gestehung eine Verminderung des CO₂-Ausstoßes von jährlich 120.000 kg.

Für die zweite Anlagenkonzeption, Wärme- und Strom-gestehung durch ein Diesel-MHKW, ergeben sich neben den geringeren spezifischen Investitionskosten sowie den höheren elektrischen Wirkungsgraden, vor allem durch den vergleichsweise günstigen Brennstoffpreis, durchweg geringere Amortisationszeiten als bei den Gas-Otto-MHKW. Für die Variante VI, ein Diesel-MHKW mit einer elektrischen Leistung von 98 kW, liegt die Amortisationszeit der notwendigen Investitionen bei 3,1 Jahren (Eigenfinanzierung) bzw. bei 3,4 Jahren (Fremdfinanzierung).

Die thermische Leistung des hier angeführten MHKW liegt bei 122 kW und damit unter der oben genannten Mindestleistung von 172 kW. Somit ist für den Betrieb der Flaschenwaschmaschine eine „unterstützende“ Wärmeversorgung durch das derzeitige Dampfnetz notwendig, welches in der Jahressumme einen Restwärmebedarf von 57.300 kWh und Geste-

hungskosten von 2.400 DM bedeutet. Die Eigenstromerzeugung durch das MHKW beläuft sich auf 588.000 kWh/a, wodurch sich die Strombezugskosten um etwa 104.000 DM vermindern. Gleichzeitig entstehen durch den Brennstoffbedarf des MHKW (1,5 Mio. kWh) sowie durch die jährlichen Betriebskosten der KWK-Anlage Wärmegestehungskosten in Höhe von 58.600 DM pro Jahr. Der monetäre Vorteil der Eigenstromerzeugung bewirkt in der Summe eine jährliche Reduktion der Energiekosten um 51.300 DM.

Die Emissionsbilanz weist unter Berücksichtigung aller vorgelagerten und am jeweiligen Ort der Energieumwandlung auftretenden Emissionen eine CO₂-Reduktion von jährlich 37.300 kg aus. Die gesamten CO₂-Emissionen des untersuchten Betriebes reduzieren sich damit von 1.337.700 kg/a auf 1.300.400 kg/a.

Maßnahmen zur betrieblichen Wärmerückgewinnung

Im Bereich der Prozeßwärmeanwendung werden im betrachteten Unternehmen bereits große Potentiale zur betrieblichen Energierückgewinnung genutzt. Im wesentlichen sind dies die Wärmerückgewinnung durch den Pfannendunstkondensator (die bei der Würzekochung entstehenden Brüden werden kondensiert und die anfallende Kondensationswärme dient der Erwärmung des kalten Brauwassers) sowie durch den Einsatz von kaltem Brauwasser zur Abkühlung der heißen Würze (einerseits wird Brauwasser vorgewärmt und andererseits elektrischer Strom eingespart, der für die Kühlung der Würze auf die Anstelltemperatur von 7 °C benötigt wird).

Der hier bereits zur Wärmerückgewinnung eingesetzte Pfannendunstkondensator (PfaDuKo) bietet überdies eine weitere Möglichkeit zur **Wärmenutzung**. Das anfallende **Brüdenkondensat** wird naturgemäß nicht genutzt, d.h. die Abwärme des knapp 100 °C heißen Kondensates wird derzeit ohne weitere Verwendung abgeführt. Wird davon ausgegangen, daß je Sud etwa 7 hl bzw. 0,7 m³ Wasser verdampfen und der PfaDuKo in etwa mit einem Wirkungsgrad von 0,9 arbeitet, fällt je Sud ca. 0,63 m³ Kondensat an. Ein Nutzungsbereich für die anfallende Wärme wäre z.B. die Raumwärme. Hierbei wird überschlagsmäßig eine nutzbare Temperaturdifferenz von 35 K angenommen (Abkühlung des Kondensates von 95 auf 60 °C bei einem Heizungssystem mit einer Vorlauftemperatur von 90 °C und einer Rücklauftemperatur von 70 °C als Wärmesenke). Bei einer Heizzeit von etwa einem halben Jahr ergibt sich bei 333 Suden eine Kondensatmenge von 206 m³, die wiederum bei der erwähnten Temperaturdifferenz von 35 K eine übertragbare Wärmemenge von rund 8.500 kWh/a ergibt. Mit Hilfe des durchschnittlich ansetzbaren Brennstoffpreises von 3,61 Pf/kWh ergibt sich eine jährliche Kosteneinsparung von 307 DM. Infolge der geringen Energie- und Kosteneinsparungen sind keine wirtschaftlich interessanten Amortisationszeiten der notwendigen Investitionen (Wärmeübertrager, Umbauarbeiten, Verrohrungen etc.) zu erwarten, weshalb hier auf eine detailliertere Analyse verzichtet wird.

Andere etwaige Nutzungsmöglichkeiten des Brüdenkondensates sind mit weiteren Problemen behaftet. Dazu gehört, daß der aus dem Brauprozess gewonnene Brüden mit organischen Substanzen, wie Hopfenharzen und ätherischen Ölen, versetzt ist, die sich auf Anlagenteile absetzen und beispielsweise Wärmeübertrager verkleben. Diese müssen dadurch häufig gereinigt werden, um einen Totalausfall durch Überhitzung zu vermeiden, der durch den verminderten Wärmeübergang auftreten kann. Eine Wiedereinleitung des Brüdenkondensates in das Produkt (z.B. als Einmischwasser) sollte auch vermieden werden, da es so zu Geschmacksbeeinträchtigungen des Bieres kommen kann. Da der wärmetechnische Gewinn den Aufwand für die Aufbereitung des Brüdenkondensates nicht übersteigen darf, werden zahlreiche Versuche mit Filtersystemen oder Umkehrosmose gemacht, die aber bisher in der Praxis nicht zu akzeptablen Ergebnissen geführt haben [16].

Eine weitere Maßnahme zur betrieblichen Wärmerückgewinnung wäre der Einsatz eines Wärmeübertragers zur **Nutzung der überschüssigen Wärme beim Übergang des Einmischwassers aus dem Heißwasserbehälter** in die Maischepfanne. Bisher wird zur Einhaltung der definierten Einmischtemperatur von $60,5^{\circ}\text{C}$ das aus dem Heißwasserspeicher kommende Wasser (ca. 82°C) durch eine Beimischung von kaltem Brauwasser auf die erforderliche Einmischtemperatur abgekühlt. Für den Fall, daß die Raumwärmeversorgung als entsprechende Wärmesenke dient, wird im folgenden eine Grobabschätzung hinsichtlich der möglichen Energierückgewinnung sowie der ökonomischen Umsetzbarkeit der Maßnahme durchgeführt.

Unter der Berücksichtigung, daß ein konventionelles Heizungssystem (VL 70°C / RL 50°C) als Wärmesenke dient, kann die theoretisch mögliche Temperaturdifferenz bei Verwendung eines Gegenstrom-Wärmeübertragers vollständig übertragen werden. Das heißt, bei einer benötigten Wassermenge von 80 hl, einer Einmischtemperatur von $60,5^{\circ}\text{C}$ und einer Temperatur des Heißwassers im Speicherbehälter von ca. 82°C liegt eine nutzbare Temperaturdifferenz von 21,5 K vor. Wird diese Temperaturspreizung mit der anfallenden Wassermenge von $0,8\text{ m}^3/\text{Sud}$, der Dichte (1.000 kg/m^3) sowie der spezifischen Wärmekapazität ($4,19\text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$) von Wasser multipliziert, so ergibt sich eine nutzbare Wärmemenge von 20 kWh je Sud. Unter der Annahme einer halbjährlichen Heizzeit (ca. 333 Sude) entspricht dies einer Wärmeenergie von rund 6.660 kWh. Da die im Einmischwasser vorhandene Energiemenge nicht vollständig übertragen werden kann, wird hierbei ein Wärmetauscherwirkungsgrad von 0,9 zugrundegelegt, so daß letztlich dem Heizungssystem eine zusätzliche Wärmemenge von 6.000 kWh zur Verfügung steht. Da im Sudhaus des hier untersuchten Betriebes durch die bereits vorhandenen Wärmerückgewinnungsmaßnahmen, Pfannendunstkondensator und Würzekühler, ein Überangebot an Heißwasser vorliegt, wird keine zusätzliche Einbringung von kaltem Wasser, welches einer Nachheizung bedarf, erforderlich. Die berechnete Nutzwärme kann somit vollständig zur Brennstoffeinsparung berücksichtigt werden. Demnach reduziert sich bei einem Jahresnutzungsgrad des Dampferzeugers von 0,86 der jährliche Brennstoffbedarf um rund 7.000 kWh, welches für die derzeitigen spezifischen Endenergiekosten von 3,61 Pf/kWh (Mischpreis Heizöl/Erdgas) zu einer ebenfalls nur geringen Kosteneinsparung von 252 DM pro Jahr führt.

Als weitere Maßnahme zur Wärmerückgewinnung wird im folgenden auf die evtl. **Abwärmennutzung der elektrischen Antriebe zur Druckluftversorgung** eingegangen. Im untersuchten Betrieb wird die notwendige Druckluft in zwei Verdichterstationen mit jeweils zwei baugleichen Verdichterkompressoren bereitgestellt. Die elektrische Antriebsleistung der Kompressoren liegt bei 22 kW. Bei den hier eingesetzten wassergekühlten Kompressoren kann in etwa 72 % der aus dem Stromnetz entnommenen elektrischen Energie als Wärmeenergie zurückgewonnen werden¹. Die zurückgewonnene Wärmeenergie beträgt insgesamt bei einem Stromverbrauch zur Druckluftherzeugung von 118.500 kWh/a auf rund 85.000 kWh/a. Unter der Annahme, daß hierfür ein Brennstoffpreis von 3,61 Pf/kWh angesetzt wird, berechnet sich die jährliche Kosteneinsparung auf 3.070 DM. Da sich jedoch die mögliche Energieeinsparung auf insgesamt vier Kompressoren verteilt und zudem die bauliche Situation im untersuchten Betrieb keine Wärmenutzung in unmittelbarer Nähe der Druckluftstationen zuläßt, wird auch hier auf eine weitergehende Untersuchung dieser Maßnahme aus wirtschaftlichen Gründen verzichtet.

Tabelle 3.1 faßt die Ergebnisse im Bereich Prozeßwärme abschließend zusammen. Hinsichtlich der diskutierten Maßnahmen ist allein der Einsatz eines MHKW zur unterstützenden Wärmeversorgung der Flaschenreinigungsmaschine wirtschaftlich umsetzbar. Dabei zeigt sich, daß das Diesel-BHKW aufgrund des günstigen Brennstoffpreises sowie der im Vergleich zu Gas-Otto-BHKW höheren Stromkennzahl (höherer Anteil der Stromerzeugung) die günstigsten Randbedingungen aufzeigt.

¹ Becker, K. *Diplomarbeit: Entwicklung und Auslegung eines Sekundärkühlsystems für die Brauerei Beck & Co.* Lehrstuhl für Nukleare und Neue Energiesysteme der Ruhr-Universität Bochum, RUB E-D- 340, Bochum, November 1998.

Tabelle 3.1. Übersicht über die Maßnahmen zur Optimierung der Prozeßwärmeanwendung

Maßnahme:	Gas-Otto-BHKW				Diesel-BHKW		
	Variante I	Variante II	Variante III	Variante IV	Variante V	Variante VI	Variante VII
Einsparungen:							
Brennstoff [Tsd. kWh/a]:	-1.265	-1.679	-1.841	-2.126	-803	-1.295	-1.620
Strom [Tsd. kWh/a]:	432	570	672	715	390	588	710
CO ₂ [t/a]:	44	71	120	97	19	37	42
Kosten:							
Investitionen [Tsd. DM]:	185	195	215	235	135	150	190
Betrieb [Tsd. DM/a]	11,9	15,4	18,0	19,2	9,8	14,4	17,4
Brennstoff [Tsd. DM/a]	-44,0	-58,5	-64,2	-74,1	-21,7	-35,9	-45,3
Strom [Tsd. DM/a]	76,5	100,9	118,9	126,6	69,0	104,1	125,6
Dynamische Amortisationszeit [a]:							
Eigenfinanzierung	11,89	8,32	6,57	8,13	4,40	3,11	3,23
Fremdfinanzierung	17,26	10,46	7,82	10,16	4,94	3,39	3,52
Anmerkungen: Negative Zahlen bedeuten Mehrausgaben, Mehrverbräuche etc.							

3.2 Raumwärme

Für die Raumwärmeversorgung des Betriebes wird mit rund 171.000 kWh etwa 6,7 % des Gesamtenergieverbrauchs eingesetzt. Der Raumwärmebedarf im Produktionsbereich ist aufgrund der Abstrahl- und Transmissionsverluste der Produktionsanlagen (Maische- und Würzepfanne im Sudhaus oder Flaschenreinigungsmaschine in der Abfüllung) von eher untergeordneter Bedeutung. Teilweise werden Dampfheizlüfter in Hallenzwischenbereichen (keine Abwärmenutzung aus dem Produktionsprozeß möglich) oder zur Vermeidung von Schwadenbildung (Flaschenabfüllung) eingesetzt. Der Wärmebedarf für die Büro- bzw. Ausstellungsräume wird mittels eines Heißwassersystems bereitgestellt, wobei eine Kopplung des Heizungssystems an den Dampfkreislauf über einen Wärmeübertrager erfolgt.

Maßnahmen zur Vermeidung unnötigen Energieverbrauchs und zur Senkung des derzeitigen Nutzenergiebedarfes

Zur Reduktion des derzeitigen Energiebedarfs im Anwendungsbereich „Raumwärme“ können bspw. unterschiedliche Maßnahmen zur Verringerung der Transmissionsverluste durch die Gebäudehülle diskutiert und hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen Umsetzbarkeit analysiert werden. Aufgrund des allgemein guten Zustandes der derzeitigen Bausubstanz sowie der i.d.R. äußerst kapitalintensiver Wärmeschutzmaßnahmen in Form einer nachträglichen Wärmedämmung von Wand- oder Dachflächen oder dem Austausch der vorhandenen Fenster durch solche mit speziellen Wärmeschutzverglasungen wird daher von eingehenden Betrachtungen im Rahmen dieser Arbeit Abstand genommen. Wirtschaftlich sinnvolle Amortisationszeiten der Investitionen für Wärmeschutzmaßnahmen an der Gebäudehülle ergeben sich im allgemeinen zudem nur, wenn diese Maßnahmen in ohnehin anstehende Sanierungsmaßnahmen an der Außenhaut eines Gebäudes integriert werden können, um so auftretende Kostensynergien (z.B. Kosten für Gerüstbau) nutzen zu können [vgl. 5, 6].

Hierbei sei nochmals darauf hingewiesen, daß rationelle Energieverwendung im Bereich „Raumwärme“ deswegen berücksichtigt wird, weil Energie für die Beheizung des Betriebsgebäudes aus Wärmerückgewinnungsmaßnahmen im Bereich „Prozeßwärme“ (z.B. Kondensatnutzung) gewonnen wird. Die Raumwärme dient somit als notwendige Wärmesenke, da zumeist im Produktionsbereich, bedingt durch fest definierte Prozeßparameter im Brauvorgang (Einmischtemperaturen, Dauer der Würzekochung etc.), in der hier untersuchten Branche ein Wärmeüberangebot besteht.

3.3 Brauchwarmwasser

Die Brauchwarmwasserbereitung im untersuchten Unternehmen benötigt in etwa 8.300 kWh pro Jahr. Im Vergleich zum Gesamtenergieverbrauch entspricht dies einem Anteil von nur 0,3 %. Aufgrund des marginalen Anteils der Energieverwendung für die Brauchwarmwasser-

gestehung am Gesamtenergieverbrauch werden Maßnahmen zur rationellen Energieverwendung für diesen Bereich im Rahmen dieser Arbeit nicht nähergehend erörtert.

Dennoch soll erwähnt werden, daß eine Möglichkeit zur Senkung des derzeitigen Nutzenergiebedarfes darin besteht, den dampfgespeisten Brauchwarmwasserspeicher durch eine direkte Warmwasserbereitung mittels Durchlauferhitzer zu ersetzen. Der Verringerung von Speicher- und Verteilungsverlusten und damit der entsprechenden Einsparung des Brennstoffbedarfes steht jedoch ein Mehrbedarf der hochwertigen und vergleichsweise teuren Endenergie Strom gegenüber, so daß diese Maßnahme letztlich aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten i.d.R. wenig attraktiv ist [vgl. 5, 6].

3.4 Kraft

Der größte Anteil des Strombedarfes wird zum Antrieb elektrischer Maschinen genutzt. Der derzeitige Energiebedarf entspricht mit ca. 828.450 kWh einem Anteil von ca. 93 % des gesamten Strombedarfes. In diesem Bereich können z.T. beträchtliche Einsparungen erzielt werden. Die Durchführung von Maßnahmen zur rationellen Energieverwendung setzt allerdings detaillierte Kenntnisse der Einsatzweise, der Auslastung und der Bauart der installierten elektrischen Antriebe voraus. Da betriebliche Messungen im Rahmen der Untersuchung nicht durchführbar waren, können die folgenden Ausführungen nur Hinweise auf die Möglichkeiten zur Minimierung des Antriebsenergieverbrauchs geben (vgl. auch [9-11]).

Einen wesentlichen Einfluß auf den im praktischen Einsatz erzielbaren Wirkungsgrad und damit auf die Höhe der elektrischen Energieverluste hat die richtige Dimensionierung des Antriebes. Dies wiederum setzt die genaue Kenntnis des vorgesehenen Einsatzzweckes und damit des geforderten Leistungs-, Drehmoment- und Drehzahlverlaufs voraus. Verschiedene Untersuchungen haben jedoch gezeigt, daß ein großer Teil der in der Industrie eingesetzten Antriebe überdimensioniert ist. Als Gründe hierfür sind die Unkenntnis des genauen Lastspiels, ein ausgeprägtes Sicherheitsdenken sowie Fehleinschätzung der Motoreigenschaft ausschlaggebend [12].

Die Überdimensionierung von Motoren wirkt sich in mehrfacher Hinsicht negativ aus. Zum einen werden die Investitionskosten erhöht, zum anderen werden überdimensionierte Antriebe zwangsläufig im Teillastbereich mit einem schlechteren Wirkungsgrad betrieben. Abbildung 3.1 zeigt den typischen Verlauf des elektrischen Wirkungsgrades eines Drehstrom-Asynchronmotors in Abhängigkeit von der abgegebenen Leistung.

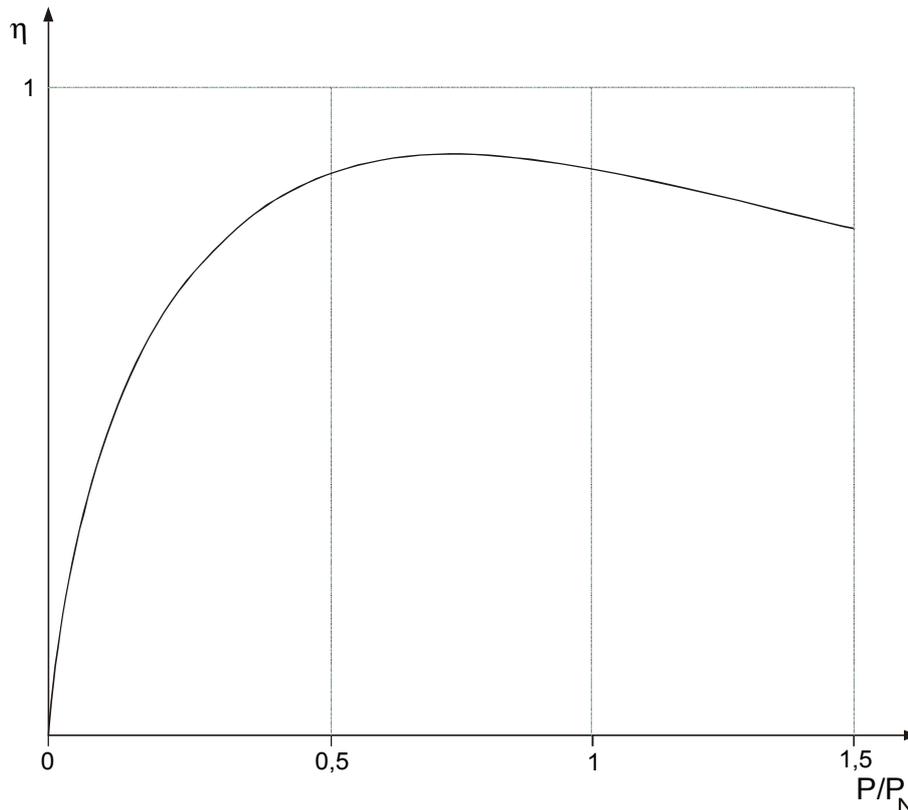


Abbildung 3.1 Wirkungsgradlinie eines Elektromotors

Der Wirkungsgrad steigt von Null im Leerlauf mit wachsender Last schnell an und ändert sich ab ca. 50 bis 60 % der Nennlast nur noch geringfügig. Das Maximum liegt zwischen 75 und 100 % der Nennleistung. Darüber fällt der Wirkungsgrad langsam wieder ab. Für den Leistungsfaktor ergibt sich ein ähnliches Bild. Es wird deutlich, daß der energetisch günstigste Betriebsbereich zwischen 50 und 100 % der Nennleistung liegt. Wegen des steilen Wirkungsgradabfalls im Bereich geringer Auslastungen bis etwa 50 % können bei der Auswahl von neuen Antrieben (z. B. bei Ersatz eines defekten Motors) signifikante Einsparungen realisiert werden. Dabei ist zu beachten, daß Asynchronmotoren, die die größte Verbreitung in der Industrie besitzen, für kurze Zeit (im Minutenbereich) bis zum 1,5-fachen ihrer Nennleistung betrieben werden können. Dabei muß allerdings bei sich regelmäßig wiederholenden Lastspielen auf die Einhaltung der thermischen Maximalbelastung für den Antrieb geachtet werden [9, 11]. Eine Möglichkeit, den spezifischen Stromverbrauch zu verringern, stellt die Auslastung der Produktionsanlagen bis an die Nennkapazität dar, sofern der Produktionsprozeß dies zuläßt. Teillastbetrieb ist wegen der schlechteren Wirkungsgrade zu vermeiden. Häufig wird darüber hinaus der Durchlaufbetrieb für günstiger als der Aussetzbetrieb gehalten, da der Energieaufwand zum Anfahren von Anlagen wegen zu hoher Anlaufströme überschätzt wird. Da der Anlaufstrom jedoch nur über sehr kurze Zeit fließt, ist ein Abschalten von Maschinen in Pausenzeiten meistens energetisch äußerst sinnvoll und ohne nachteilige Auswirkung auf die Motorlebensdauer oder den Produktionsprozeß. Ausnahmen hiervon bilden allerdings Präzisionsmaschinen, bei denen die Maßänderungen infolge Abkühlung zu Ausschuß führen würde [9]. Diese organisatorischen Maßnahmen bergen häufig

größere Energieeinsparpotentiale als technische Verbesserungen, ohne großen Aufwand zu erfordern.

Dagegen läßt sich der **Austausch von überdimensionierten, funktionsfähigen Antrieben** wirtschaftlich in der Regel nur in Fällen extremer Überdimensionierung mit tatsächlichen Belastungen unterhalb von einem Drittel der Nennleistung rechtfertigen, da der Wirkungsgrad erst unter einer Auslastung von 50 % deutlich zurückgeht. Tabelle 3.2 gibt einen Überblick über exemplarisch gerechnete Möglichkeiten des Motorenersatzes bei zwei verschiedenen zweipoligen Drehstrom-Kurzschlußläufermotoren, die jeweils nur zu einem Viertel ihrer Nennleistung ausgelastet sind und gegen Motoren mit der halben Nennleistung getauscht werden.

Tabelle 3.2. Übersicht über exemplarische Motorersatzmaßnahmen

Maßnahme:	15 kW => 7,5 kW		2,2 kW => 1,1 kW	
	Neumotor	Gebrauchtmotor	Neumotor	Gebrauchtmotor
Einsparungen:				
Strom [kWh/a]:	588	588	160	160
CO ₂ [kg/a]:	473	473	129	129
Kosten:				
Investitionen [DM]:	750	550	190	100
Strom [DM/a]	104,1	104,1	28,3	28,3
Dynamische Amortisationszeit [a]:				
Eigenfinanzierung	8,3	9,1	7,7	3,8
Fremdfinanzierung	10,4	6,8	9,4	4,2

Dabei wurde sowohl der Ersatz gegen einen Neumotor als auch gegen einen gebrauchten, überholten Motor betrachtet. Auffällig ist die kürzere Amortisationszeit bei den kleineren Motoren, die zum Beispiel beim Tausch eines 2,2 kW - gegen einen gebrauchten 1,1 kW - Motor bei Eigenfinanzierung nur 3,8 Jahre bzw. bei Fremdfinanzierung 4,2 Jahre beträgt. Der Grund hierfür liegt in dem bei kleinen, unter Teillast betriebenen Motoren stärkeren Wirkungsgradabfall. Weiter wird deutlich, daß der Tausch gegen überholte Gebrauchtmotoren ökonomisch wesentlich günstiger ist, da deren Investitionskosten im Durchschnitt um 30 bis 40 % unter denen fabrikneuer Motoren liegt (vgl. Firmenangaben in [17, 19]). Für die Berechnung notwendige Wirkungsgrade wurden aus der Literatur entnommen (vgl. [19]).

Eine wenig aufwendige Möglichkeit zur Verringerung des Energieverbrauchs bei unterbelasteten Drehstrom-Antrieben, die zudem nahezu ohne investiven Aufwand durchzuführen

ist, stellt die Umschaltung von Dreieck- auf Sternbetrieb dar. Voraussetzung ist allerdings, daß die betreffenden Motoren für diese Maßnahme ausgelegt sind. Insbesondere muß die Ständerwicklung für die verkettete Spannung ausgelegt und die Leitungsenden frei zugänglich sein. Soll eine Umschaltung während des Anlaufvorganges oder lastabhängig während der Produktion durchgeführt werden, muß der Prozeß den dabei auftretenden Drehmomentensprung zulassen [11].

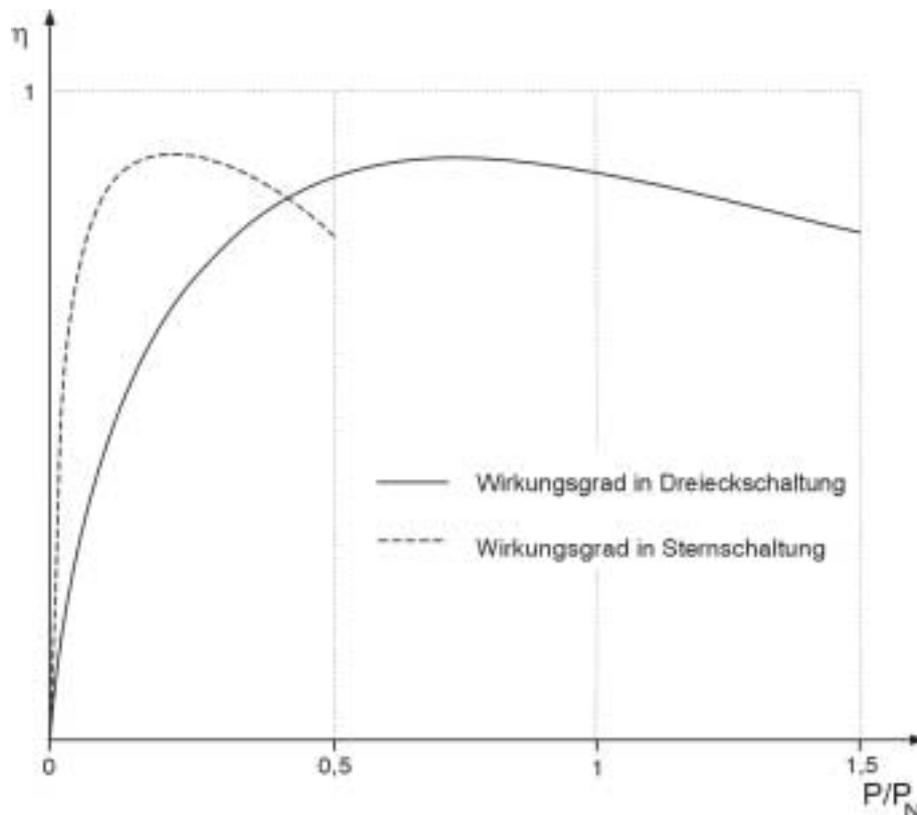


Abbildung 3.2 Wirkungsgradkennlinie eines Elektromotors bei Stern- und Dreieckschaltung

In Abbildung 3.2 ist der Wirkungsgradverlauf eines Asynchron-Drehstrommotors über der abgegebenen Leistung bei Stern- und Dreieckschaltung dargestellt. Für den Leistungsfaktor ergeben sich ähnliche Verhältnisse. Das Drehmoment einer Asynchron-Maschine ist im Sternbetrieb bei etwa gleicher Drehzahl um den Faktor 3 kleiner als bei Dreieckschaltung. Der Wirkungsgrad- und Leistungsfaktorverlauf über der Leistung ist daher um den Faktor 3 gestaucht. Es ist deutlich zu erkennen, daß der Wirkungsgrad bei Betrieb in Sternschaltung bis zu einer Motor-Auslastung von ungefähr 40 % erheblich höher als bei Dreieckschaltung ist. Weitere Vorteile ergeben sich durch niedrigere Anlaufströme. Nachteilig ist dagegen die längere Hochlaufzeit. Diese Möglichkeit stellt eine preiswerte Alternative zum Austausch von Motoren dar und sollte bei Maschinen, die ständig mit einer Auslastung von weniger als 40 % ihrer Nennleistung betrieben werden, durchgeführt werden.

Eine weitere Möglichkeit zur rationellen Energieanwendung stellt die **Frequenzumformertechnik (FU)** dar. Die Regelung mit Hilfe von Frequenzumformern kommt bereits überall dort zum Einsatz, wo definierte Momentenverläufe, Kräfte, Drehzahlen oder Geschwindigkeiten erforderlich sind. Typische Anwendungsbeispiele sind Hebezeuge, Bandanlagen, Prüfeinrichtungen, Bühnentechnik oder Frässpindeln. Diese anspruchsvollen und z.T. hochdynamischen Antriebsaufgaben werden mit Hilfe einer sog. feldorientierten Regelung gelöst. Eine preiswertere Variante stellt die sog. U/f-Kennliniensteuerung dar, die sich für einfachere Anwendungen, wie beispielsweise den Antrieb von Pumpen, Lüftern oder Zentrifugen, anbietet.

Gerade bei Strömungsmaschinen kann die FU-Technik eine sinnvolle und energiesparende Alternative zu konventionellen Regelungen sein. Je nach Anwendungsfall (Laufzeiten, Teillastbetrieb, Leistungsbereich etc.) kann mit Endenergieeinsparungen in einem Bereich von 10 bis 40 % gerechnet werden. Um beispielsweise die Durchflußmenge einer Pumpe an den tatsächlichen Bedarf anzupassen werden verschiedene konventionelle Konzepte angewandt:

- Niveauregulierung, d.h. Befüllen eines Speichers mit maximaler Pumpleistung und Ausschalten der Pumpe bis zum Erreichen eines minimalen Füllstandes,
- Drosselklappenregelung, d.h. Einbringen eines Strömungswiderstandes in die Rohrleitung in Form einer Drosselklappe zur Dissipation der nicht benötigten Förderarbeit,
- Antrieb über ein drehzahlvariables mechanisches Getriebe.

Alle Lösungen haben ihre spezifischen Nachteile: Bei der Niveauregelung ist das Vorhandensein eines Speicherbehälters erforderlich. Zudem ist die Häufigkeit der zulässigen An- und Abschaltvorgänge bei Elektromotoren begrenzt. Jeder Anfahrvorgang eines Motors bedeutet eine erhöhte mechanische und thermische Belastung der Antriebseinheit, welche die Lebensdauer des Antriebs verkürzt. Darüber hinaus werden durch den z.T. um ein Vielfaches erhöhten Anlaufstrom Strombezugsspitzen erzeugt.

Die Drosselklappenregelung stellt eine besonders einfache Variante dar, die mit geringem regelungstechnischen und konstruktivem Aufwand zu realisieren ist. Nachteilig ist der konstant hohe Energieverbrauch, da auch im Teillastbereich mit maximaler Pumpenleistung gefördert wird.

Eine Drehzahlsteuerung ist sinnvoll bei Antrieben, die mit mehreren veränderlichen Arbeitspunkten betrieben werden. Typische Einsatzbereiche sind hierbei Lüfter-, Pumpen- und Gebläsemotoren, wie z.B. die Heizlüfter in den Produktionshallen oder die Kesselspeisewasserpumpe. Diese Maschinen sollten bei wechselnden Anforderungen an die Fördermengen nicht drossel-, sondern drehzahl geregelt sein. Bei Arbeitsmaschinen, die nur in einem Arbeitspunkt betrieben werden, sind allerdings wegen des Eigenbedarfs der Stellglieder richtig dimensionierte Antriebsmotoren die energetisch und ökonomisch günstigere Lösung.

Eine Möglichkeit der Kostenoptimierung bietet sich dem untersuchten Betrieb in der **Einführung eines Lastmanagementsystems**. Das Lastmanagementsystem dient dabei primär zur Vermeidung punktueller Stromspitzen, sekundär auch zur Optimierung des Stromlastverlaufes des Betriebes. Die dadurch bedingte Änderung der Ganglinien kann als Konsequenz einen Wechsel zu einem günstigeren Stromvertrag oder auch den Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen zur Eigenstromerzeugung zur Folge haben. In ein Lastmanagementsystem werden mögliche Nebenaggregate (u.a. Lüftungsanlage, Druckluft, Kälteanlage) ebenso integriert wie die Produktionsanlagen, sofern deren Betriebsweise dazu geeignet ist.

Für das EVU bezieht der „Idealkunde“ die elektrische Energie möglichst gleichmäßig über das gesamte Jahr. In der Praxis hängt der Energiebezug dagegen vom jeweiligen Produktionsprozeß ab, so daß beim „Realkunden“ oft Leistungsspitzen bei der Stromversorgung entstehen.

Die EVUs sind also darauf bedacht, eine möglichst konstante Auslastung der Kapazitäten zu erreichen. Dies spiegelt sich in den zu entrichtenden Tarifen für den Arbeits- und Leistungspreis wider. Beim Arbeitspreis (Pf/kWh), welcher sich auf die bezogenen Kilowattstunden bezieht, sind Mengenrabatte mit steigendem Energiebezug üblich. Beim Leistungspreis (DM/kW) dagegen wird der Kunde mit einem Zuschlag belegt, welchen er pro Höchstleistung entrichten muß. Dieser kann bei einer entsprechenden Leistungs-/Verbrauchsrelation einen Großteil der gesamten Stromkosten eines Betriebes ausmachen.

Attraktiv für ein EVU sind also Energiekunden, die wenig Leistung im Verhältnis zum gesamten Energieverbrauch benötigen. Dies drückt sich deutlich in dem sogenannten Benutzungsstundenrabatt aus, der sich aus dem Jahresverbrauch (kWh) dividiert durch die Jahresspitzenleistung (kW) errechnet. Diese Stundenzahl ist Grundlage für die Tarifstruktur vieler Energieversorger. Bei hoher Stundenzahl kann der Kunde folglich einen Preisnachlaß erhalten.

Gegenüber Möglichkeiten zur Verbrauchseinsparung, die oftmals nur durch hohe Investitionen zu realisieren sind, bieten Einsparungen beim Leistungspreis oftmals große Kosteneinsparpotentiale bei geringen Amortisationszeiten. Dabei genügt es unter Umständen, daß Lastmanagementsysteme in einem kurzen Zeitraum einige Aggregate abschalten oder sie hindern anzulaufen. Lastmanagementsysteme können diese Aufgabe optimal übernehmen. Ziel einer modernen Energiekontrolle ist es, das Leistungssparpotential optimal zu nutzen und damit zu möglichst niedrigen Spitzenlastwerten zu gelangen, ohne dabei den Produktionsablauf groß zu beeinträchtigen.

Die Jahreshöchstleistung ergibt sich je nach EVU als Mittelwert der beiden (oder drei) höchsten Monatsmaxima. Diese wiederum werden im allgemeinen durch Viertelstunden-Leistungsmittelwerte von einem Maximumzähler erfaßt und über den Abrechnungszeitraum hinaus gespeichert. Diese Meßeinrichtung ist in der Regel beim Hauptzähler installiert. Nach Ablauf einer Meßperiode beginnt der Maximumzähler die nächste Messung. Diese Messung registriert die bezogene Arbeit während der Zeit einer Meßperiode (meist 15-min-Werte) und

bildet durch Division der Arbeit durch die Zeit einen durchschnittlichen Leistungswert. Der registrierte Wert hängt also von der Höhe der Momentanleistung und von der Dauer des Zeitraums, über den diese Leistung benötigt wurde, ab. Entscheidend ist also nicht die Höhe kurzer Momentanleistungsspitzen, sondern nur die Menge der verbrauchten Arbeit während einer ganzen Meßperiode.

Bei der monatlichen Ablesung des Verbrauchszählers wird neben den bezogenen Kilowattstunden auch der Höchstwert vom Maximumzähler erfaßt. Da sich der Leistungspreis aus den zwei (oder drei) höchsten monatlichen Maximumwerten des gesamten Jahres berechnet, wird deutlich, daß unter Umständen eine Viertelstunde mit einem hohen Verbrauch die Stromrechnung eines ganzen Jahres in die Höhe treibt, zumal der Spitzenwert oftmals durch ein rein zufälliges Zusammenspiel von unkontrollierten Verbrauchereignissen zustande kommt.

Ein Lastmanagementsystem garantiert dagegen bei sachgerechter Anwendung die Einhaltung eines festen Leistungsmaximums und sorgt damit für einen relativ fest kalkulierbaren Leistungspreis. Das System basiert auf der Kontrolle des Leistungs- bzw. Arbeitsbezuges innerhalb der vom EVU festgelegten Meßperiode. Eine hohe Viertelstundenleistung bedeutet, daß in diesem Zeitfenster der Leistungsbedarf vieler Energieverbraucher gleichzeitig zusammentrifft. Dieses zeitliche Zusammentreffen zu hoher Leistungsanforderung verhindert das System, indem es die zeitliche Staffelung der Energieverbraucher im Betrieb organisiert.

Früher wurden zur Energiekontrolle sogenannte Maximumwächter installiert, welche bei Erreichen einer fest eingestellten Maximalleistung angeschlossene Energieverbraucher in dem Betrieb abschalteten. Diese einfache Methode der Energiekontrolle führte dazu, daß die Energieverbraucher wesentlich häufiger und vor allem überflüssigerweise abgeschaltet wurden. Es ist aber durchaus möglich, eine höhere Leistung kurzzeitig in Anspruch zu nehmen, ohne daß Energieverbraucher abgeschaltet werden müssen, solange die benötigte Leistung nicht über die gesamte Meßperiode beansprucht wird.

Die neueren Energiekontrollsysteme oder Lastmanagementsysteme arbeiten daher mit einem Optimierungsrechner. Dieser schaltet erst dann Energieverbraucher ab, wenn der Leistungsmittelwert innerhalb einer Meßperiode den eingestellten Maximalwert überschreitet. Der Optimierungsrechner arbeitet dabei synchron mit dem Zähler des Stromlieferanten. Aufgrund der gemessenen Momentanleistung und der in der Meßperiode bereits verbrauchten Arbeit wird zyklisch auf den Viertelstundenwert zum Ende der laufenden Meßperiode hochgerechnet. Über einen Eingangskontakt wird dem Rechner daher mitgeteilt, wann eine neue Meßperiode beginnt. Mit dem Meßsignal für die Momentanleistung ist es dann möglich, einen Trend für die letztlich vom EVU erfaßte Leistung zu berechnen. Liegt das tendenziell errechnete Leistungsmittel über dem eingestellten Leistungsgrenzwert, werden Energieverbraucher abgeworfen. Die Abschaltung erfolgt also nur bei Überlast des Leistungsgrenzwertes, bei Freilast werden dann die Verbraucher wieder zugeschaltet. Durch dieses Trendberechnungsverfahren wird deutlich, daß die Anzahl der Leistungsabwürfe weitaus geringer als die beim veralteten Maximumwächter ist.

Neben der Trendberechnungsmethode gibt es auch noch das Integrationsverfahren. Bei diesem wird ebenso die verbrauchte Arbeit in kurzen Meßintervallen ermittelt und diese auf die zu erwartenden Leistungsspitzen während der Meßperiode hochgerechnet.

Ein weiterer Vorteil eines Lastmanagementsystems ist die Möglichkeit, eine große Anzahl von Verbrauchern anzuschließen, die über Schaltrelais den geeigneten Energieverbraucher bei Bedarf kurzzeitig unterbrechen. Die Art und Weise, wie das System die notwendigen Abschaltungen ausführt, ist somit vom Anwender nach den Anforderungen seines Betriebes und der technischen Eigenheit des jeweiligen Verbrauches über eine Prioritätenliste genau zu parametrieren. Die Prioritäten werden dabei den Anlagen in Form von Zahlen zugewiesen, die je nach Produktionsprozeß neu vergeben werden können. Ein Lüfter erhält z. B. eine niedrige Priorität (eins), während ein Kompressor eine größere (zehn) hat. Gleiche Prioritäten werden dann abwechselnd bewertet. Neben der Parametrisierung der Verbraucher ist die Visualisierung von Energiemanagementsystemen von großer Bedeutung. Hierzu gibt es für jedes System eine PC-Software oder geeignete Protokolldrucker. Durch die Transparenz des Energieverbrauchs und des Momentanbezugs ist der Bediener immer in der Lage, das System anzupassen und den Sachverhalt den Mitarbeitern und der Betriebsleitung darzulegen. Dabei ist die Akzeptanz der Mitarbeiter für den Einsatz eines Energiekontrollsystems äußerst wichtig, gerade wenn man nicht nur Nebenaggregate, sondern auch Produktionsanlagen an ein solches System anschließt.

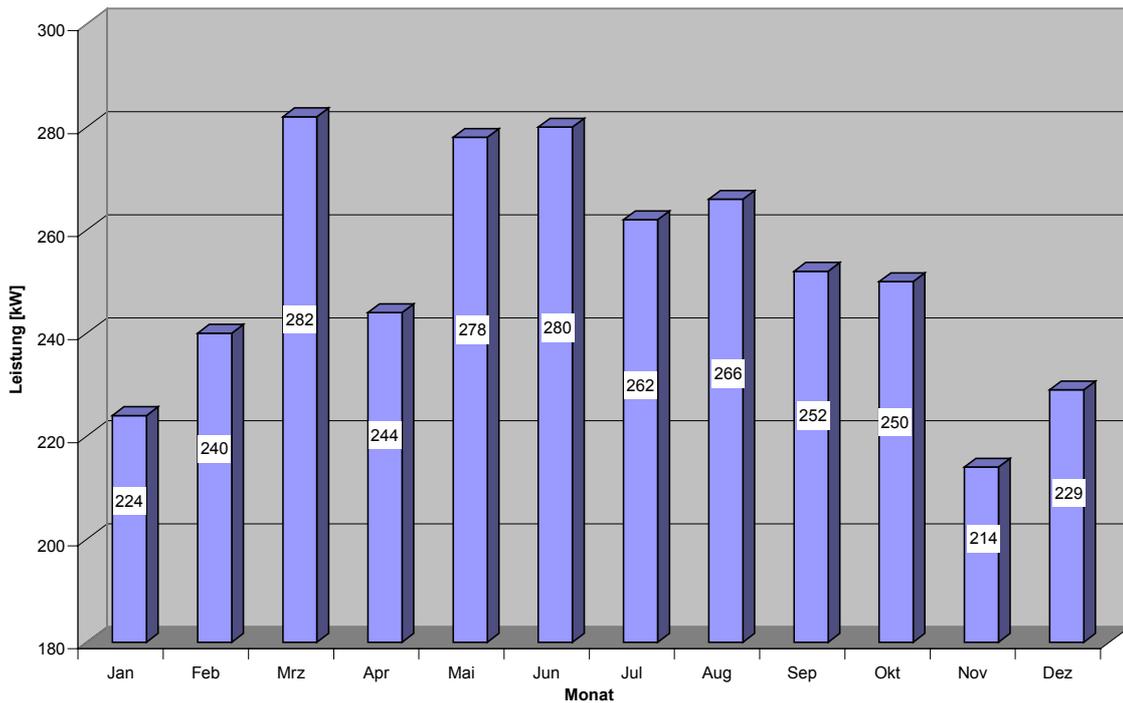


Abbildung 3.3 Gemessene Spitzenleistung des Strombezuges in kW je Kalendermonat

Im Hinblick auf eine Auslegung eines Lastmanagementsystems in Verbindung mit einer nachfolgenden realistischen Kostenreduktionsabschätzung ist neben der Angabe der installierten Leistung aller Antriebe sowie mögliche Mindest- und Maximal-Abschaltzeiten je Antrieb bzw. Verbraucher vor allem eine detaillierte Analyse der Viertelstundenwerte des Leistungsmittels über einen Zeitraum von mehreren Wochen notwendig. Die Zielsetzung der Bezugsoptimierung und, die Kostensenkung durch Verlagerung der Stromspitzen in Bereiche niedrigerer Leistungsbeanspruchung, sind nur durch die genaue Kenntnis des Lastganges des Betriebes zu erreichen. Da die genaue Auslegung eines Lastmanagementsystems über den Rahmen dieser Arbeit hinausgeht, wird im folgenden eine Grobauslegung eines solchen Systems durchgeführt, wobei Abbildung 3.3 die Potentiale einer Leistungsreduktion des Strombedarfes offenlegt. Die dargestellten Leistungswerte sind den EVU-Rechnungen des untersuchten Betriebes entnommen, die je Monat die höchste bezogene Leistung ausweisen.

Bei der derzeitigen Verbrauchsstruktur bewirkt die berechnete Leistungsspitze (gemittelt aus den drei höchsten Monatsspitzen) einen Kostenfaktor an den gesamten Strombezugskosten von 69.720 DM, welches einem Anteil von 44 % der Gesamtkosten entspricht. Wird davon ausgegangen, daß die Leistungsspitze in etwa um 30 kW reduziert wird, vermindern sich die Leistungskosten bei einem Leistungspreis von 249 DM/kW um 7.470 DM. Die Investitions-

kosten von 25.000 DM amortisieren sich somit bei einer Eigenfinanzierung innerhalb von 3,6 Jahren und bei einer vollständigen Fremdfinanzierung in 4,0 Jahren.

Tabelle 3.3. Zusammenfassung weiterer Energie- bzw. Kostenpotentiale im Bereich "Kraft"

Maßnahme:	Frequenzumformer			Lastmanagement-system
	2,2 kW Motor	7,5 kW Motor	15 kW Motor	30 kW Leistungsreduzierung
Einsparungen:				
Strom [kWh/a]:	240	-1.679	2.126	-
Stromkosten [DM/a]:	42,5	570	715	7.470
CO ₂ [kg/a]:	193	71	97	-
Kosten:				
Investitionen [DM]:	1.254	195	235	25.000
Dynamische Amortisationszeit [a]:				
Eigenfinanzierung	>> 10	8,32	8,13	3,6
Fremdfinanzierung	∞	10,46	10,16	4,0

3.5 Beleuchtung

Der Stromverbrauch des untersuchten Betriebes für die künstliche Beleuchtung liegt bei rund 42.000 kWh, welches einem Anteil am Gesamtstromverbrauch von 4,7 % entspricht. Die derzeitige Beleuchtungssituation spiegelt insgesamt einen sparsamen Umgang mit der Ressource „Beleuchtungsstrom“ wider. So ist bspw. im Sudhaus, dem Raum mit der höchsten installierten Beleuchtungsleistung (2,2 der insgesamt 15,9 kW), eine zeitverzögerte automatische Abschaltung von zwei Drittel der angebrachten Leuchtstofflampen installiert worden. Das Sudhaus, als zentraler Raum von Betriebsbesichtigungen, ist damit für Besucherführungen optimal ausgeleuchtet, währenddessen im normalen Arbeitsbetrieb eine um 66 % reduzierte Beleuchtungsleistung ausreicht.

Im Beleuchtungssektor bestehen im untersuchten Betrieb keine wesentlichen Energieeinsparpotentiale. Zum einen handelt es sich bei einem der beiden verwendeten Leuchtentypen um moderne Spiegelrasterleuchten, deren Lichtstärkeverteilung zum Zweck einer Lampen- und damit auch Stromreduzierung nicht mehr signifikant verbessert werden kann. Die zweite im Betrieb vorkommende Leuchtenart ist jeweils mit einzelnen Leuchtstofflampen bestückt. Durch Reflektoren könnte die Lichtausbeute dieser Leuchtenart zwar verbessert werden, aber von einer Lampenreduzierung wird dennoch abgesehen, da es sich hierbei um Einzel-

lampen handelt, so daß bei einer Deinstallation einzelner Leuchten evtl. Flächen mit nicht ausreichender Beleuchtung entstehen können (Schattenbildung).

Eine Möglichkeit, Endenergie einzusparen bietet sich in der **Anwendung eines Lichtsteuerungssystems**. Beispielhaft werden hierzu zwei Räume untersucht, die einerseits über moderne Spiegelrasterleuchten verfügen und bei denen andererseits ein ausreichender Tageslichteinfall eine entsprechende Beleuchtungsstärkereduktion ermöglicht. Die ausgewählten Räume (Labor, Büro) werden zudem in divergierenden Zeitfolgen belegt, so daß evtl. eine sensorische Erfassung von Raumbewegungen sinnvoll sein kann.

Die tageslichtabhängige Lichtregelung wird dabei so in das Beleuchtungssystem integriert, daß der Stromverbrauch der Beleuchtung durch eine Spannungsregelung gesenkt wird. Da die insbesondere bei Einschaltvorgängen auftretenden Spannungsspitzen durch das Lichtregelsystem verhindert werden, verlängert sich auch die Lampenlebensdauer um bis zu 100 %, wodurch sich weiterhin Wartungs- und Entsorgungskosten reduzieren. Ein zusätzlicher Vorteil der Spannungsüberwachung liegt in einer besseren Raumausleuchtung, da die Lampenwirkungsgrade im Teillastbereich verbessert werden können. Die universelle Anwendbarkeit ist insoweit gewährleistet, als Systeme angeboten werden, die sowohl für konventionelle (KVG) als auch für elektronische Vorschaltgeräte (EVG) eingesetzt werden können.

Hinsichtlich der Verwendung von Bewegungsmeldern bietet sich der Einsatz von sog. „**lernfähigen Präsenzmeldern**“ an. Diese sind durch intelligente Schaltungen in der Lage, sich dem jeweiligen Benutzerverhalten anzupassen. Die lernfähige Steuerung ermöglicht „adaptive Nachlaufzeiten“, d.h. intelligente Ausschaltverzögerung zur selbstständigen Anpassung an das Nutzerverhalten, so daß ein häufiges Ein- und Ausschalten bei entsprechenden Raumbewegungen (konventionelle Bewegungsmelder) vermieden wird.

In den beiden sich idealerweise für eine tageslichtabhängige Lichtsteuerung anbietenden Räumen sind insgesamt 42 Leuchtstofflampen installiert, die bei einer durchschnittlichen Brenndauer von 2.000 h (Labor) bzw. 2.500 h (Büro) einen Jahresstromverbrauch von 1.848 kWh aufweisen. Der Stromverbrauch und damit ebenso die jährlich aufzubringenden Stromkosten (derzeit 327 DM) können durch die erwähnten Präsenzmelder um ca. 20 % reduziert werden. Dadurch reduziert sich der Stromverbrauch auf 1.480 kWh, was einer Stromkostenreduzierung durch den verminderten Energiebedarf von rund 65 DM pro Jahr entspricht. Bei einem notwendigen Investitionsvolumen von 1.000 DM für zwei Präsenzmelder mit Tageslichtsensor können keine wirtschaftlich sinnvollen Amortisationszeiten berechnet werden.

3.6 Kommunikation

Im Bereich der Kommunikation kann von keinerlei sinnvollen Einsparpotentialen ausgegangen werden, da zumeist Rechner, Monitore sowie Drucker bereits mit Stromsparfunktionen ausgestattet sind, welche die Geräte bei entsprechender Nichtnutzung in einen sog. Stromsparmodes versetzen.

3.7 Innovative Energiesysteme, Einsatz erneuerbarer Energien

Im allgemeinen kann der Einsatz innovativer und neuer Energietechniken evtl. für den Bereich der Wärmebereitstellung wirtschaftlich umsetzbar sein. Da im untersuchten Bereich einerseits der Bedarf an warmem Brauchwasser vergleichsweise gering ist sowie - bedingt durch den Produktionsprozeß - andererseits ein Wärmeüberschuß im Sudhausbereich zu verzeichnen ist (hier kann die anfallende Wärme durch verschiedene Maßnahmen wirtschaftlich genutzt werden), ist der Einsatz von derzeit noch relativ teuren regenerativen Energiesystemen unter den gegebenen Bedingungen wenig sinnvoll. Auf die nähergehende Untersuchung, inwieweit z.B. der Einsatz einer Wärmepumpe zur gekoppelten Gesteuerung der Raumwärme- und Brauchwasserenergie oder der Betrieb einer Brennstoffzelle zur gekoppelten Gesteuerung von Strom und Brauchwarmwasser möglich ist, wird daher verzichtet.

4 Bewertung der verschiedenen Maßnahmenbündel

Die im vorherigen Kapitel diskutierten Einzelmaßnahmen zur Optimierung der bestehenden Energieversorgung in den verschiedenen Anwendungsbereichen werden nachfolgend zusammenfassend bewertet, indem ein "Ranking" erarbeitet wird, welches die Priorität einer Maßnahme im Hinblick auf ihre Wirtschaftlichkeit wiedergibt. Als Gliederungskriterium dient dabei die Amortisationszeit als Maß für die Dauer der mit einer Maßnahme verbundenen Kapitalbindung unter der Annahme einer Fremdfinanzierung.

Die in Kapitel 3 dargestellten Maßnahmen verstehen sich dabei z.T. als Alternativen zueinander (z.B. wurden verschiedene Systeme zur Kraft-Wärme-Kopplung betrachtet), so daß die möglichen Gesamtenergieeinsparungen nur durch eine sinnvolle Kombination verschiedener Maßnahmen zu bewerten ist. Hierbei besteht eine Vielzahl von Variationsmöglichkeiten, die nicht umfassend zu bewerten sind. Deshalb wird für den Fall minimaler Amortisationszeiten der Einzelmaßnahmen eine Strategie aufgezeigt, um die Verringerung der heutigen CO₂-Emissionen zu maximieren. Als Obergrenze wird dabei eine Amortisationszeit von acht Jahren gewählt.

4.1 Ranking zur Durchführung von Einzelmaßnahmen

Werden die im Kap. 3 dargestellten Einzelmaßnahmen hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit, d.h. hinsichtlich ihrer dynamischen Amortisationszeit (hier Fremdfinanzierung) in eine Prioritätenliste angeordnet, zeigt sich die Bedeutung der vorgestellten Einzelmaßnahmen (vgl. Tab. 4.1 bzw. Tab. 4.2) im Vergleich. Dabei werden zur besseren Bewertung der einzelnen Maßnahmen nicht nur die wirtschaftlichen Größen der Amortisationszeit und der realen Investitionshöhe, sondern auch die umweltrelevanten Größen der Endenergie- und Kohlendioxideinsparung übersichtlich einander gegenübergestellt.

In Tab. 4.1 und Tab 4.2 wird dargestellt, wie die im dritten Kapitel vorgestellten Einzelmaßnahmen aus den einzelnen Anwendungsbereichen im Vergleich zu bewerten sind. Es zeigt sich, daß investive Maßnahmen vor allem aus dem Anwendungsbereich „Prozeßwärme“ und „Kraft“ wirtschaftlich, d.h. zu dynamischen Amortisationszeiten bis zu 10 Jahren führen. Hierbei ist zu beachten, daß insgesamt vier Kraft-Wärmekopplungsvarianten (drei Diesel- und ein Gas-Otto-BHKW) unter den vorherrschenden Einsatzbedingungen wirtschaftlich betrieben werden können. Demzufolge ist bei der Bündelung der Maßnahmen zu einer kostenoptimalen Maßnahmenkombination darauf zu achten, daß von alternativ einzusetzenden Einzelmaßnahmen nur die wirtschaftlichste Investition vorzusehen ist, sofern geänderte Randbedingungen nicht zu einer Prioritätsverschiebung führen (vgl. Kap. 4.2).

Tabelle 4.1 Prioritätenliste der Einzelmaßnahmen in der Reihenfolge ihrer dynamischen Amortisationszeiten (Teil I)

Nr.	Maßnahme	Amortisationszeit [a]	Investition [Tsd. DM]	Energieeinsparung [Tsd. kWh]	CO ₂ -Einsparung [t/a]	Anwendungsbereich
1	Diesel-BHKW Variante VI	3,4	150	-	37	PW
2	Diesel-BHKW Variante VII	3,5	190	-	42	PW
3	Lastmanagementsystem	4,0	25	-	-	Kraft
4	Motorersatz (gebraucht): 2,2 kW => 1,1 kW *	4,2	0,10	0,16	0,129	Kraft
5	Diesel-BHKW Variante V	4,9	135	-	19	PW
6	Motorersatz (gebraucht): 15 kW => 7,5 kW *	6,8	0,55	0,59	0,473	Kraft
7	Gas-Otto-BHKW Variante III	7,8	215	-	120	PW
8	Motorersatz (neu): 2,2 kW => 1,1 kW *	9,4	0,19	0,16	0,129	Kraft
9	Gas-Otto-BHKW Variante IV	10,2	235	-	97	PW
10	Motorersatz (neu): 15 kW => 7,5 kW *	10,4	0,75	0,59	0,473	Kraft
11	Gas-Otto-BHKW Variante II	10,5	195	-	71	PW

Tabelle 4.2 Prioritätenliste der Einzelmaßnahmen in der Reihenfolge ihrer dynamischen Amortisationszeiten (Teil II)

Nr.	Maßnahme	Amortisationszeit [a]	Investition [Tsd. DM]	Energieeinsparung [Tsd. kWh]	CO ₂ -Einsparung [t/a]	Anwendungsbereich
12	Frequenzumformer (15 kW Motor)	14,6	3,80	2,40	1,931	Kraft
13	Gas-Otto-BHKW Variante I	17,3	185	-	44	PW
14	Frequenzumformer (7,5 kW Motor)	18	2,12	1,20	0,966	Kraft
Weitere Maßnahmen, für die keine Amortisationszeiten berechnet werden können:						
	Frequenzumformer (2,2 kW Motor)	-	1,25	0,24	0,193	Kraft
	Lichtsteuerungssystem	-	1,0	0,37	0,297	Beleuchtung
	WRG-Einmischwasser	-	-	7,33	1,79	RW
	WRG-Druckluft	-	-	85	65	RW
	WRG-Brüdenkondensat PfaDuKo	-	-	9,88	2,41	RW
Abkürzungen:		* Bei Ersatzmaßnahmen der Elektromotoren ist zunächst die Auslastung der einzelnen Motoren zu prüfen. Erst bei geringeren durchschnittlichen Auslastungen als 30 % ihrer Nennleistung wird aufgrund des stark sinkenden Wirkungsgrades des Motors ein Austausch sinnvoll.				
PW: Prozeßwärme						
RW: Raumwärme						

Als wirtschaftlichste Einzelmaßnahme ist eines der berechneten Kraftwärmekopplungsvarianten zu bezeichnen. Die Investitionen für das Diesel-BHKW (Variante VI) in Höhe von rund 150.000 DM amortisieren sich unter den gegebenen Randbedingungen innerhalb von 3,4 Jahren. Eine Energie- bzw. CO₂-Einsparung kann hierbei (noch) nicht ausgewiesen werden, da die vollständige Wärmenutzung des BHKW noch nicht abschließend zugewiesen wurde. Das heißt, derzeit liegt die Wärmebereitstellung durch das BHKW über dem notwendigen Wärmebedarf der Flaschenwaschmaschine. Der wirtschaftliche Vorteil der betrachteten Maßnahme ergibt sich durch die gleichzeitige elektrische Stromerzeugung, die den Mehraufwand an Brennstoff durch den verminderten Strombezug mehr als ausgleicht.

Ein weiteres erfolgversprechendes Konzept stellt mit einer dynamischen Amortisationszeit von 4 Jahren die Einführung eines Lastmanagementsystems dar. Durch Leistungsschwankungen im Strombezug zeigt sich allein bereits durch die Auswertung der monatlichen Leistungsangaben der EVU-Rechnung ein bedeutendes Kostensenkungspotential. Da es sich dabei um einen Ausgleich von Lastschwankungen im Betrieb handelt, wird dadurch jedoch der Stromverbrauch und somit auch die entsprechenden CO₂-Emissionen nicht vermindert.

Aufgrund der in der Regel relativ geringen Auslastung der Elektromotoren von etwa 50 % (vgl. Kap. 3.4) zeigt sich aus Tab. 4.1 und 4.2, daß die hinsichtlich wirtschaftlicher Gesichtspunkte an Priorität 4 anzuordnende Maßnahme, der Austausch nicht ausgelasteter kleinerer Elektromotoren (2,2 kW_{el}) gegen richtig ausgelegte 1,1 kW_{el} Gebraucht-Motoren ist. Durch jeden Motorenaustausch lassen sich bei Amortisationszeiten von 4,2 Jahren und Investitionskosten von jeweils 100 DM rund 160 kWh/a Endenergie und etwa 130 kg/a CO₂ einsparen. Hierbei ist zu beachten, daß Motoren nur dann ausgetauscht werden sollen, wenn eine Einzelprüfung des Motors zeigt, daß dieser zu weniger als einem Drittel seiner Nennleistung ausgelastet ist.

Die Prioritäteneinordnung hinsichtlich der dynamischen Amortisationszeit aller weiteren Einzelmaßnahmen aus Kapitel 3 sind den Tabellen 4.1 und 4.2 zu entnehmen.

4.2 Kombination verschiedener Maßnahmen mit minimalen Amortisationszeiten

Da sich verschiedene Einzelmaßnahmen bei ihrer Kombination z.T. gegenseitig beeinflussen, ist zur Bestimmung einer kostenoptimalen Kombination einzelner Maßnahmen darauf zu achten, daß der energetische „Ist-Zustand“ des Unternehmens durch die gewählten Maßnahmen (vgl. Tab. 4.1) neu bestimmt wird, um in einem iterativen Prozeß die jeweils sinnvollste Maßnahme auszuwählen.

Nach der Diskussion verschiedener Einzelmaßnahmen aus den verschiedenen Anwendungsbereichen soll an dieser Stelle ihr kostenminimale Kombination vorgestellt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, daß es sich lediglich um eine beispielhaft ausgesuchte Maßnahmenkombination handelt. Wie den Tabellen 4.1 und 4.2 entnommen werden kann, gibt

es eine Vielzahl verschiedener Einzelmaßnahmen, insbesondere Kraft-Wärmekopplungsanlagen, deren wirtschaftlicher Einsatz im betrachteten Unternehmen gewährleistet werden kann, so daß alternative Maßnahmenkombinationen ebenfalls sinnvoll sein können.

An dieser Stelle wird eine Kombination vorgestellt und diskutiert, welche maßgeblich durch zwei Kriterien bestimmt wird. Zum einen ist dies die dynamische Amortisationszeit, die im vorliegenden Fall eine Dauer von 6,8 Jahren nicht überschreitet und zum anderen ist dies die kumulierte CO₂-Einsparung. Bei der Auswahl der Einzelmaßnahmen aus dem in den Tabellen 4.1 und 4.2 vorgestellten „Ranking“ ist zu beachten, daß sich bei in Frage kommenden Maßnahmen die Randbedingungen eines evtl. Einsatzes ändern können, so daß die jeweilige Wirtschaftlichkeit und Effektivität hinsichtlich der CO₂-Emissionsminderung neu zu überprüfen ist.

Als erste zu realisierende Maßnahme ergibt sich aus dem „Ranking“ mit einer Amortisationszeit der notwendigen Investitionen (150.000 DM) von 3,4 Jahren der Einsatz eines Diesel-BHKW zur gekoppelten Strom- und Wärmeabgabe. Ausgelegt ist das BHKW entsprechend den Wärmeanforderungen der Flaschenwaschmaschine. Eine Wärmenutzung, die über die Betriebszeiten der Waschmaschine hinausgeht, ist hierbei noch nicht eingerechnet, so daß für diesen Fall - trotz einer jährlichen Kosteneinsparung von rund 51.300 DM - keine Energieeinsparung ausgewiesen werden kann. Beachtet werden muß jedoch, daß der Bezug der „hochwertigen“ Energieart Strom durch den Bezug des Energieträgers Heizöl substituiert wird, so daß es durch die Berücksichtigung der Emissionen in den vorgelagerten Prozeßketten dennoch zu einer CO₂-Reduktion von 37 t pro Jahr kommt.

Der Einsatz des Lastmanagementsystems wäre nach der Prioritätenliste die nächstfolgende umzusetzende Maßnahme. Allerdings findet - wie bereits erwähnt - eine direkte Beeinflussung durch evtl. nachfolgende Maßnahmen statt. Das Lastmanagementsystem dient der Überwachung aller vorhandenen elektrischen Aggregate hinsichtlich deren Leistungsbezuges. Beim Austausch elektrischer Antriebe durch Motoren kleinerer elektrischer Leistung würden sich die Randbedingungen des Strombezuges verschieben. Daher ist zunächst der Austausch kleinerer und mittlerer Elektromotoren vorzunehmen, bei denen eine entsprechende Überdimensionierung festgestellt werden kann. Unter der Annahme, daß etwa 25 kleinere Motoren und ca. 10 mittlere elektrische Antriebe den realistischen Bedarfsansprüchen angepaßt werden, ergibt sich insgesamt eine Endenergieeinsparung von rund 9.900 kWh, welche von einer Verminderung der CO₂-Emissionen um jährlich knapp 8.000 kg begleitet wird.

Die anschließende Einführung eines Lastmanagementsystems ist unter dem Aspekt der Kostenoptimierung einzuordnen. Bei einer Reduktion der Gesamtleistung bezüglich des elektrischen Strombezuges um 30 kW reduzieren sich die Strombezugskosten um rund 7.500 DM, wodurch sich die notwendigen Investitionen von etwa 25.000 DM in ca. 4 Jahren vollständig amortisieren.

Insgesamt reduziert sich der Energieverbrauch infolge der hier vorgeschlagenen Maßnahmen um 9.900 kWh sowie die CO₂-Emissionen um 45 t/a. Die Kosten für den verminderten Energiebezug addieren sich hingegen auf rund 60.550 DM/a, was einem Anteil von etwa 21 % der gesamten Energiekosten entspricht.

Tabelle 4.3 Ranking der umsetzbaren Maßnahmen in der Reihenfolge ihrer dynamischen Amortisationszeiten

Nr.	Maßnahme	Energieeinsparung [kWh/a]	CO ₂ -Einsparung [kg/a]	Kosteneinsparung [DM/a]	Amortisationszeit [a]
1	Diesel-BHKW Variante VI	-	37.000	51.300	3,4
2	Lastmanagementsystem	-	-	7.500	4,0
3	Motorenersatz (gebraucht) 25 x 2,2 kW => 1,1 kW	4.000	3.230	710	4,2
4	Motorenersatz (gebraucht) 10 x 15 kW => 7,5 kW	5.900	4.730	1.040	6,8
Summe:		9.900	44.960	60.550	

5 Zusammenfassung

Das Projekt "Erarbeitung von Konzepten zur Energieeinsparung sowie zur Optimierung der Energieversorgung bei kleinen Unternehmen" wird vom Lehrstuhl für Nukleare und Neue Energiesysteme der Ruhr-Universität Bochum im Auftrag des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen bearbeitet. Gegenstand der Projektarbeiten ist die energetische Analyse und die Erarbeitung möglicher Energieeinsparpotentiale für eine kleinere Brauerei mit einem Jahresausstoß von rund 70.000 hl Verkaufsbier.

Der Abbildung des Ist-Zustandes im Bereich der Energieversorgung geht die Darstellung des Produktionsablaufes voraus. Dabei wurden die wichtigsten Produktionsschritte analysiert, beschrieben und graphisch in Form von Grundfließbildern aufbereitet, um die Untersuchungen zur derzeitigen Struktur des Energieverbrauchs bzw. der Energieanwendungen zu unterstützen und zu veranschaulichen. Im Rahmen von Betriebsbegehungen wurden die erforderlichen Betriebsdaten aufgenommen und eine Energie- und Schadstoffbilanz erarbeitet. Dabei zeigt sich, daß der Energiebedarf in erster Linie durch Wärmeanwendungen im Produktionsbetrieb bestimmt wird. Rund zwei Drittel der bezogenen Endenergie werden dabei im Anwendungsbereich „Prozeßwärme“ benötigt. Der zweite wesentliche Verbrauchssektor ist der Anwendungsbereich „Kraft“, wobei hier der Stromverbrauch für elektrische Antriebe bei insgesamt 744.000kWh bzw. bei rund 23 % des Endenergieverbrauchs des betrachteten Unternehmens liegt.

Basierend auf einer detaillierten Diskussion des Ist-Zustandes der Energieversorgung, bilden Untersuchungen in den Energieanwendungsbereichen Prozeßwärme, Brauchwarmwasser, Kraft, Beleuchtung und Kommunikation die Grundlage zur Formulierung von Maßnahmen zur

- Vermeidung eines unnötigen Energieverbrauchs,
- Absenkung des derzeitigen Nutzenergiebedarfs,
- Verbesserung der Wirkungs- bzw. Nutzungsgrade bei der Energieversorgung,
- betriebliche Energierückgewinnung und Abwärmenutzung sowie
- einem Einsatz innovativer Energietechniken.

Jede der ermittelten Einzelmaßnahmen wurde energetisch, ökonomisch und ökologisch bewertet, wobei der jeweilige Berechnungsgang auf einem entsprechenden Datenblatt dokumentiert wird. Die energetische Bewertung einer Maßnahme zielt auf mögliche Endenergieeinsparungen ab. Dabei werden alle Energieträger berücksichtigt und Mehrverbräuche, durch einen zusätzlichen Brennstoffbedarf im Falle der Kraft-Wärme-Kopplung, mit Einsparungen beim Strombezug bilanziert. Die ökologischen Aspekte finden in einer Reduktion der Emission von Luftschadstoffen durch eine Verringerung des Endenergieeinsatzes Berücksichtigung. Hinsichtlich einer ökonomischen Bewertung der vorgestellten Maßnahmen wer-

den jeweils die erforderlichen Investitions-, Betriebs- sowie Brennstoffkosten ermittelt und mit Hilfe der berechneten jährlichen Kostenreduktionen die dynamische Amortisationszeit einer Maßnahme unter Berücksichtigung verschiedener Finanzierungsansätze ausgewiesen.

Im Anschluß an die Vorstellung verschiedener Maßnahmen zur Energie- bzw. Kosteneinsparung wurde ein „Ranking“ aufgestellt, in dem die aufgezeigten Varianten hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen Umsetzungsmöglichkeit geordnet dargestellt werden. Dabei werden zudem das jeweilige Investitionsvolumen und die möglichen Energieeinsparungen sowie die zu erwartende Reduktion der CO₂-Emissionen aufgeführt.

Die wirtschaftlich günstigste Einsatzmöglichkeit - mit einer Amortisationszeit von 3,4 Jahren für die benötigte Investition - wird einem Diesel-BHKW zur unterstützenden Wärmeversorgung der Flaschenwaschmaschine zugeordnet. Im Anwendungsbereich Kraft sind die größten Kosteneinsparungen in dem Einsatz eines Lastmanagementsystems zu finden. Eine Energieeinsparung ist hierbei nicht direkt, jedoch durch den Abgleich der Lastganglinien des Unternehmens evtl. sekundär möglich. Weitere Einsparpotentiale liegen ebenfalls im Bereich der elektrischen Antriebe, wie bspw. dem Austausch von überdimensionierten Motoren oder der Verwendung einer optimierten Regelung mittels Frequenzumformer. Eine Umsetzung von Maßnahmen zur betrieblichen Wärmerückgewinnung ist derzeit vor allem deshalb nicht möglich, weil im betrachteten Unternehmen keine geeigneten Wärmesenken vorliegen.

Den Abschluß dieser Arbeit bildet ein beispielhaft zusammengesetztes kostenoptimales Maßnahmenpaket, in dem Maßnahmen mit einer Amortisationszeit von weniger als 7 Jahren zusammengefaßt wurden, die sich zudem in ihrer Anwendbarkeit nicht gegenseitig beeinflussen. Bei Maßnahmen, die einen übereinstimmenden Einsatzzweck vorweisen, wie z.B. Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, wurde die jeweils günstigste Variante ausgewählt. Insgesamt können die Energiebezugskosten des Unternehmens durch dieses beispielhaft ausgesuchte Maßnahmenpaket um rund 60.550 DM pro Jahr reduziert werden; dies entspricht einem Anteil von 21 % an den Gesamtenergiekosten entspricht. Die Endenergieeinsparungen belaufen sich auf jährlich etwa 9.900kWh, die der CO₂-Emissionen auf etwa 45 t/a.

Insgesamt gesehen handelt es sich bei dem hier untersuchten Betrieb um eine energetisch wie ökologisch hervorragend geführte Brauerei, die durch ihre vielfältigen Investitionen auch im Bereich der Energie- und Schadstoffvermeidung als vorbildlich klassifiziert werden kann. Sie sollte ihre Energietechnik in geeigneten Workshops vorstellen und so auch anderen kleinen Brauereien Hinweise zur Energieoptimierung geben. Die betrachtete Brauerei strebt als ein Zeichen, daß auch kleinere Brauereien durchaus eine gute ökonomische wie ökologische Bilanz aufweisen können, eine Zertifizierung an.

6 Literatur

- [1] Ziolk et al. *Möglichkeiten und Potentiale der rationelleren Energieverwendung in kleinen und mittelständischen Unternehmen*. Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben „Verbesserung der Energiestruktur von Unternehmen“. Selbstverlag des Lehrstuhls für Nukleare und Neue Energiesysteme der Ruhr-Universität Bochum, RUB E-I-217. Bochum, August 1998.
- [2] Gutmann, H. *Bier - Wissenswertes für Genießer*. Nathan Verlag GmbH. München 1987.
- [3] Narziss, L. *Abriß der Bierbrauerei*. Fünfte ergänzte Auflage, Ferdinand Enke Verlag. Nürnberg 1986.
- [4] Narziss, L. *Die Bierbrauerei. Band: Technologie der Würzebereitung*. Sechste erweiterte Auflage. Ferdinand Enke Verlag. Nürnberg 1986.
- [5] Materialien Nr. 50: *Konzept zur Optimierung der Energieversorgung bei einem Unternehmen der Papier- und Pappeverarbeitung*. Abschlußbericht des Forschungsvorhabens des Lehrstuhls für Nukleare und Neue Energiesysteme (NES) der Ruhr-Universität Bochum. Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Essen, 1998.
- [6] Materialien Nr. 51: *Konzept zur Optimierung der Energieversorgung bei einem Unternehmen der Textilverarbeitung*. Abschlußbericht des Forschungsvorhabens des Lehrstuhls für Nukleare und Neue Energiesysteme (NES) der Ruhr-Universität Bochum. Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Essen, 1998.
- [7] Landesamt für Datenverarbeitung und Statistik Nordrhein-Westfalen. *Energiebilanz des Landes Nordrhein-Westfalen 1993*. Landesamt für Datenverarbeitung und Statistik Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf 1995.
- [8] Kröplin et. al. *Rationelle Wärmenutzung in kleinen und mittleren Betrieben*. Forschungsstelle für Energiewirtschaft München, München, 1991.
- [9] Zeitschrift: *betrieb & energie* Franzis-Verlag GmbH, Seefeld, Ausgabe 1/96.
- [10] Schildhauer, J. *Energieverbrauch der Investitionsgüter- und Nahrungs- und Genussmittelindustrie der alten Bundesländer, IKARUS-Bericht zum Teilprojekt 6 „Industrie“*. Forschungsstelle für Energiewirtschaft München, München, 1993.

- [11] Nipkow, J. *Elektrische Antriebe: Gewichtige Stromverbraucher mit großen Sparpotenzialen*. Elektrotechnik, Nr. 6, 1933, S. 59 - 63.
- [12] Schaefer, H. *Rationelle Elektrizitätsanwendung in der Industrie*. Dokumentation zum Fachkongreß „RAVEL NRW 96“ am 0.4.06.1996 in Wuppertal, Juni 1996, S. 80 - 101.
- [13] VDI-Gesellschaft Technische Gebäudeausrüstung *VDI-Richtlinie 2067 Blatt 1, Berechnung der Kosten von Wärmeversorgungsanlagen, Betriebstechnische und wirtschaftliche Grundlagen*. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1983.
- [14] Mohr, M.; Ziolk, A.; Skiba, M.; Gernhardt, D.; Ziegelmann, A.; Unger, H. *Zukunftsfähige Energietechnologien für die Industrie. Technische Grundlagen, Ökonomie, Perspektiven*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1998.
- [15] Schmitz, K.W.; Koch, G. *Kraft-Wärme-Kopplung, Anlagenauswahl, Dimensionierung, Wirtschaftlichkeit, Emissionsbilanz*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995.
- [16] Suttor, K.-H.; Suttor, W. *Handbuch der Kraft-Wärme-Kopplung*. C.F. Müller Verlag, Karlsruhe, 1991.
- [17] *Preisliste Drehstrom-Niederspannungsmotoren - Käfigläufermotoren*. Fa. Siemens AG, 1996.
- [18] *Elektro-Maschinen-Katalog*. Fa. EMZ GmbH, Recklinghausen, 1996.
- [19] *Katalog M11: Drehstrom-Niederspannungsmotoren - Käfigläufermotoren*. Fa. Siemens AG, 1994/95.
- [20] Petersen, H. *Brauereianlagen - Planung, Energieversorgung, Energiewirtschaft, Betriebstechnik, Kontrolle, Kennzahlen*. Hans Carl Verlag, Nürnberg, 1987.
- [21] Fohr, M. *1. Brewnet Forum: Neue Technologien im Brauereiwesen*. Brauwelt, Nr. 1/2, 1998.
- [22] Delitz, G. *Energieeinsparung im Sudhaus*. Brauwelt, Nr. 1/2, 1993.

- [23] Gernhardt, D., Mohr, M., Skiba, M., Unger, H. *Theoretisches und technisches Potential von Solarthermie, Photovoltaik, Biomasse und Wind in Nordrhein-Westfalen. 4. Technischer Fachbericht zur Studie „Analyse von Möglichkeiten zur praktischen Solarenergienutzung und deren Entwicklungsperspektiven in Nordrhein-Westfalen, RUB E-58.* Lehrstuhl für Nukleare und Neue Energiesysteme, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 1993.

A. Anhang

A 1. Eckdatenerhebungsbogen des betrachteten Unternehmens

Datenerfassungsbogen

1. Allgemeine Fragen

1.1) Welche Biersorten werden überwiegend hergestellt?

(Bitte eintragen!)

Premium Pils, Dunkel Bier, Spezialitäten

1.2) Wieviele Mitarbeiter sind im Unternehmen tätig?

(Bitte eintragen!)

47

Mitarbeiter

1.3) In wievielen Schichten wird gearbeitet?

(Bitte ankreuzen!)

x

1 Schicht

x

2 Schichten

3 Schichten

2. Produktionsabläufe

2.1) Welche Produktionsstufen weist das Unternehmen auf?

a) Mälzerei *(Bitte ankreuzen!)*

-	vorhanden
---	-----------

In wievielen Schichten wird gearbeitet? *(Bitte ankreuzen!)*

	1 Schicht
	2 Schichten
	3 Schichten

Welche Betriebseinheiten sind vorhanden? *(Bitte ankreuzen!)*

Reinigungsanlagen für Rohgerste (Windsichter, Siebanlagen etc.)

Rohgerstesilos

Weich- und Keimsilos

Darr- und Trockenanlagen

Entkeimungsanlagen

Malzsilos

Sonstige

Welche?

	vorhanden

b) Schrotmühlen *(Bitte ankreuzen!)*

x	vorhanden
---	-----------

In wievielen Schichten wird gearbeitet? *(Bitte ankreuzen!)*

	1 Schicht
	2 Schichten
x	3 Schichten

Welche Betriebseinheiten sind vorhanden? *(Bitte ankreuzen!)*

Trockenschrotung

Naßschrotung

Sonstige

Welche?

x	vorhanden
	vorhanden
	vorhanden

c) Brauwasseraufbereitung <i>(Bitte ankreuzen!)</i>	<input checked="" type="checkbox"/>	vorhanden
In wievielen Schichten wird gearbeitet? <i>(Bitte ankreuzen!)</i>	<input type="checkbox"/>	1 Schicht
	<input type="checkbox"/>	2 Schichten
	<input checked="" type="checkbox"/>	3 Schichten
Welche Betriebseinheiten sind vorhanden? <i>(Bitte ankreuzen!)</i>	<input type="checkbox"/>	vorhanden
Entkeimung	<input type="checkbox"/>	vorhanden
Enthärtung	<input type="checkbox"/>	vorhanden
Enteisung	<input type="checkbox"/>	vorhanden
Sonstige	<input type="checkbox"/>	vorhanden
Welche? _____		
d) Maischen <i>(Bitte ankreuzen!)</i>	<input checked="" type="checkbox"/>	vorhanden
In wieviel Schichten wird gearbeitet? <i>(Bitte ankreuzen!)</i>	<input type="checkbox"/>	1 Schicht
	<input type="checkbox"/>	2 Schichten
	<input checked="" type="checkbox"/>	3 Schichten
Welche(s) Maischverfahren setzen Sie ein? <i>(Bitte ankreuzen!)</i>	<input type="checkbox"/>	vorhanden
Dreimaischverfahren	<input type="checkbox"/>	vorhanden
Zweimaischverfahren	<input type="checkbox"/>	vorhanden
Einmaisverfahren	<input type="checkbox"/>	vorhanden
Infusionsmaisverfahren	<input checked="" type="checkbox"/>	vorhanden
Hochkurzmaisverfahren	<input type="checkbox"/>	vorhanden
Springmaisverfahren	<input type="checkbox"/>	vorhanden
Schrotmaisverfahren	<input type="checkbox"/>	vorhanden
Druckmaisverfahren	<input type="checkbox"/>	vorhanden
Sonstige	<input type="checkbox"/>	vorhanden
Welche? _____		

e) Abläuterung <i>(Bitte ankreuzen!)</i>	<input checked="" type="checkbox"/>	vorhanden
In wievielen Schichten wird gearbeitet? <i>(Bitte ankreuzen!)</i>	<input type="checkbox"/>	1 Schicht
	<input type="checkbox"/>	2 Schichten
	<input checked="" type="checkbox"/>	3 Schichten
Welche Betriebseinheiten sind vorhanden? <i>(Bitte ankreuzen!)</i>	<input checked="" type="checkbox"/>	vorhanden
Läuterbottich	<input type="checkbox"/>	vorhanden
Maischefilter	<input type="checkbox"/>	vorhanden
Sonstige	<input type="checkbox"/>	vorhanden
Welche ? _____		
f) Würzekochung <i>(Bitte ankreuzen!)</i>	<input checked="" type="checkbox"/>	vorhanden
In wievielen Schichten wird gearbeitet? <i>(Bitte ankreuzen!)</i>	<input type="checkbox"/>	1 Schicht
	<input type="checkbox"/>	2 Schichten
	<input checked="" type="checkbox"/>	3 Schichten
Welche Betriebseinheiten sind vorhanden? <i>(Bitte ankreuzen!)</i>	<input checked="" type="checkbox"/>	vorhanden
Würzepfanne(n) mit Zweizonenheizung	<input type="checkbox"/>	vorhanden
Würzepfanne(n) mit Innenbeheizung	<input type="checkbox"/>	vorhanden
Würzepfanne(n) mit Außenbeheizung	<input type="checkbox"/>	vorhanden
Sonstige	<input type="checkbox"/>	vorhanden
Welche ? _____		
Welche(s) Kochverfahren wenden Sie an? <i>(Bitte ankreuzen!)</i>	<input checked="" type="checkbox"/>	vorhanden
Niederdruckkochung (d.h. hier atmosphärisch)	<input type="checkbox"/>	vorhanden
Hochdruckkochung	<input type="checkbox"/>	vorhanden
Hochtemperaturkochung	<input type="checkbox"/>	vorhanden
Sonstige	<input type="checkbox"/>	vorhanden
Welche ? _____		

g) Würzekühlung <i>(Bitte ankreuzen!)</i>	<input checked="" type="checkbox"/>	vorhanden
In wievielen Schichten wird gearbeitet? <i>(Bitte ankreuzen!)</i>	<input type="checkbox"/>	1 Schicht
	<input type="checkbox"/>	2 Schichten
	<input checked="" type="checkbox"/>	3 Schichten
Welches Kühlverfahren wenden Sie an? <i>(Bitte ankreuzen!)</i>		
Vorkühlung der Würze mit Brauwasser	<input checked="" type="checkbox"/>	vorhanden
Kühlung durch die zentrale Kälteanlage	<input checked="" type="checkbox"/>	vorhanden
Sonstige	<input type="checkbox"/>	vorhanden
Welche ?		
h) Gärung <i>(Bitte ankreuzen!)</i>	<input checked="" type="checkbox"/>	vorhanden
In wievielen Schichten wird gearbeitet? <i>(Bitte ankreuzen!)</i>	<input checked="" type="checkbox"/>	1 Schicht
	<input type="checkbox"/>	2 Schichten
	<input type="checkbox"/>	3 Schichten
Welche Betriebseinheiten sind vorhanden? <i>(Bitte ankreuzen!)</i>		
Kalte Gärung (Anstellen bei 7 °C, Gärtemperatur 7-9 °C)	<input checked="" type="checkbox"/>	vorhanden
Warme Gärung (Anstellen bei 7-8 °C, Gärtemperatur 10-12 °C)	<input type="checkbox"/>	vorhanden
CO ₂ -Rückgewinnungsanlage	<input type="checkbox"/>	vorhanden
Nachgärung/Reifung	<input checked="" type="checkbox"/>	vorhanden
Filtration	<input checked="" type="checkbox"/>	vorhanden
Sonstige	<input type="checkbox"/>	vorhanden
Welche?		

i) Abfüllanlagen <i>(Bitte ankreuzen!)</i>	x	vorhanden
In wieviel Schichten wird gearbeitet? <i>(Bitte ankreuzen!)</i>	x	1 Schicht
		2 Schichten
		3 Schichten
Welche Betriebseinheiten sind vorhanden? <i>(Bitte ankreuzen!)</i>		
Flaschenabfüllanlagen	x	vorhanden
Faßabfüllanlagen	x	vorhanden
Reinigungsanlagen	x	vorhanden
Sterilisierung		vorhanden
Pasteurisierung für Überseebiere		vorhanden
Sonstige		vorhanden
Welche ? _____		

3. Derzeitiger Energieeinsatz (Achtung: Datenbasis Jan. – Okt. 98)

3.1) Welche Energieträger finden im Betrieb Anwendung?

a) Brennstoffe (Bitte eintragen!)

Braunkohle		[kWh/a]
Steinkohle		[kWh/a]
Erdgas	1.896.166	[kWh/a]
Heizöl EL	1.250.635	[kWh/a] (1997: 125.041 l/a)
Heizöl S		[kWh/a]
Flüssiggas		[kWh/a]
Holz		[kWh/a]
Sonstige		[kWh/a]
Welche?		[kWh/a]

b) Strombezug

Jährlicher Strombezug (Bitte eintragen!)	889.392	[kWh/a]
EVU (Bitte Namen eintragen!)	VEW	
Tarifmodell (Bitte ankreuzen!)	x	Zweitarifsystem
		Eintarifsystem

c) **Gasbezug**

Versorgungsunternehmen

WFG _____

Tarifmodell (*Bitte ankreuzen!*)

x

Zweitarifsystem

Eintarifsystem

d) **Fernwärme**Jährlicher Wärmebezug (*Bitte eintragen!*)

--

[kWh/a]

Versorgungsunternehmen

Tarifmodell (*Bitte ankreuzen!*)

Zweitarifsystem

Eintarifsystem

e) **Sonstige Energien**Strom (*Bitte eintragen!*)

--

[kWh/a]

Wärme (*Bitte eintragen!*)

--

[kWh/a]

Sind Anlagen zur energetischen Trebernutzung oder Reststoffnutzung vorhanden ? Wenn ja, welche ? (*Bitte eintragen!*)

Der Treber wird derzeit sehr kostendeckend an Landwirte abgegeben

3.2) Welche Energieanlagen bzw. Übergabestationen sind installiert ?

a) Heizungs- u. Kesselsysteme *(Bitte eintragen!)*

Warmwasserbereiter

	therm. Leistung
	Baujahr
	Brennstoff
	Laufzeit [h/a]

	therm. Leistung
	Baujahr
	Brennstoff
	Laufzeit [h/a]

Dampferzeuger

3.600 kW	therm. Leistung
1994	Baujahr
Gas/Öl	Brennstoff
3.685	Laufzeit [h/a]

(1997)
(max. 5,5 t/h Sattdampf bei 9 bar(ü))

	therm. Leistung
	Baujahr
	Brennstoff
	Laufzeit [h/a]

b) KWK-Anlagen *(Bitte eintragen!)*

BHKW-Systeme

	therm. Leistung
	Baujahr
	Brennstoff
	Laufzeit [h/a]

	therm. Leistung
	Baujahr
	Brennstoff
	Laufzeit [h/a]

Gasturbinen

	therm. Leistung
	Baujahr
	Brennstoff
	Laufzeit [h/a]

	therm. Leistung
	Baujahr
	Brennstoff
	Laufzeit [h/a]

c) Kälteanlagen *(Bitte eintragen!)*

Kompressionsanlagen	(30 kW _{el})	100 kW	Kälteleistung	90 kW	Kälteleistung(40 kW _{el} , 15,10,10)
		1991	Baujahr	1985	Baujahr
		Strom	Brennstoff	Strom	Brennstoff
		1.923	Laufzeit [h/a]	8.600	Laufzeit [h/a]
Absorptionsanlagen			Kälteleistung		Kälteleistung
			Baujahr		Baujahr
			Wärmequelle		Wärmequelle
			Laufzeit [h/a]		Laufzeit [h/a]

d) Strombereitstellung *(Bitte eintragen!)*

Vertragsleistung	?	[kW]
Spannungsebene	? (10 kV)	[KV]

e) Fernwärmebereitstellung *(Bitte eintragen!)*

Vertragsleistung		[kW]
Soll-Vorlauftemperatur		[°C]
Soll-Rücklauftemperatur		[°C]
Maximaler Volumenstrom		[cbm]

- | | | | |
|-------------|---|--|--------|
| 3.3) | Jährliche Energiekosten des Unternehmens <i>(Bitte eintragen!)</i> | <input type="text" value="282.490"/> | [DM/a] |
| 3.4) | Jährlicher Produktionswert des Betriebes <i>(Bitte eintragen!)</i> | <input type="text" value="ca. 13 Mio."/> | [DM/a] |
| 3.5) | Energiekostenanteil am Produktionswert <i>(Bitte eintragen!)</i> | <input type="text" value="2,2"/> | [%] |

4.) Stand der betrieblichen Energietechnik

- | | | | |
|-------------|---|-----------------------------------|----|
| 4.1) | Sind im Unternehmen Anlagen zur Abwärmenutzung vorhanden ?
Falls ja, wo werden diese Systeme eingesetzt ?
PfaDuKo im Sudhaus | <input type="text" value="ja"/> | ja |
| <hr/> | | | |
| 4.2) | Setzt der Betrieb regenerative Energiequellen ein ?
Wenn ja, welche sind das ? | <input type="text" value="nein"/> | ja |
| <hr/> | | | |
| <hr/> | | | |
| <hr/> | | | |

A 2. Berechnungs- und Datenblätter der vorgeschlagenen Maßnahmen im Anwendungsbereich „Prozeßwärme“

**Tabelle A.1 Daten- und Berechnungsunterlagen zur Energieeinsparmaßnahme:
„Gas-Otto-BHKW, Variante I“**

Maßnahme: Einsatz eines Gas-Otto-BHKW, Variante I (Flaschenwaschmaschine)			
Ist-Zustand			
Nutzenergiebedarf Prozeßwärme (Aufheizen)	kWh/a	89.440	
Nutzenergiebedarf Prozeßwärme (Betrieb)	kWh/a	107.672	
Endenergiebedarf (Prozeßwärme)	kWh/a	229.200	
Laufzeit Betrieb	h/a	626	
durchschnittl. therm. Leistung	kW	172	
Endenergiepreis	Pf/kWh	3,61	
jährliche Kosten	DM/a	8.274	
elektrischer Strombedarf (gesamt)	kWh/a	889.000	
spezifischer Strompreis	Pf/kWh	17,7	
Maßnahme: Gas-Otto-BHKW - 72 kW_{el}			
Feuerungswärmeleistung	kW	249	
thermische Leistung	kW	137	
elektrische Leistung	kW	72	
thermischer Wirkungsgrad	%	55	
elektrischer Wirkungsgrad	%	29	
gesamter Wirkungsgrad	%	84	
Stromkennzahl	-	0,53	
Volllaststunden	h	6.000	
Energiebilanz			
Wärmelieferung BHKW	kWh/a	822.000	
Stromlieferung BHKW	kWh/a	432.000	
Brennstoffbedarf BHKW	kWh/a	1.494.000	
Eigenstromerzeugung	kWh/a	432.000	
Wärmenutzung	%	19,1	
Restwärmebedarf Flaschenwaschmaschine	kWh/a	40.110	
Kostenbetrachtung			
spezifische Investitionen BHKW	DM/kW _{el}	2.569	
Investitionen BHKW	DM	184.968	
Reparatur/Wartung BHKW (2,5 % der Stromerzg.)	DM/a	10.800	
Wartung Gebäude	DM/a	150	
Versicherung (0,5% von Investitionskosten)	DM/a	925	
Betriebskosten, gesamt	DM/a	11.875	
spezifischer Gaspreis	Pf/kWh	3,5	
spezifischer Strompreis	Pf/kWh	17,7	
Brennstoffkosten BHKW	DM/a	52.290	
Endenergiekosten alt	DM/a	8.274	
Restwärmekosten	DM/a	1.684	
Wärmegeheimungskosten neu (inkl. Betriebskosten)	DM/a	64.165	
Kosteneinsparungen durch Eigenstromerzeugung	DM/a	76.464	
jährliche Minderausgaben	DM/a	18.890	
Wirtschaftlichkeitsbetrachtung			
Investitionskosten	DM	184.968	
jährliche Kosteneinsparungen	DM/a	18.890	
		Eigenfinanzierung	Fremdfinanzierung
Zinssatz bereinigt	%	3,14	7,07
Amortisationszeit, statisch	a	45,20	45,20
Amortisationszeit, dynamisch	a	11,89	17,26
Emissionen			
Schadstoff	Ist-Zustand	Einsparung durch Maßnahme	Verbleibende Emissionen
	kg/a	kg/a	kg/a
CO ₂	1.337.707,0	88.491,1	1.249.215,9
CO	468,4	-93,3	561,7
SO ₂	790,3	274,6	515,6
NO _x	974,1	3,2	970,9
NOMVOC	114,3	-17,7	132,0
Staub	76,7	29,3	47,4

**Tabelle A.2 Daten- und Berechnungsunterlagen zur Energieeinsparmaßnahme:
„Gas-Otto-BHKW, Variante II“**

Maßnahme: Einsatz eines Gas-Otto-BHKW, Variante II (Flaschenwaschmaschine)			
Ist-Zustand			
Nutzenergiebedarf Prozeßwärme (Aufheizen)	kWh/a	89.440	
Nutzenergiebedarf Prozeßwärme (Betrieb)	kWh/a	107.672	
Endenergiebedarf (Prozeßwärme)	kWh/a	229.200	
Laufzeit Betrieb	h/a	626	
durchschnittl. therm. Leistung	kW	172	
Endenergiepreis	Pf/kWh	3,61	
jährliche Kosten	DM/a	8.274	
elektrischer Strombedarf (gesamt)	kWh/a	889.000	
spezifischer Strompreis	Pf/kWh	17,7	
Maßnahme: Gas-Otto-BHKW - 95 kW_{el}			
Feuerungswärmeleistung	kW	318	
thermische Leistung	kW	179	
elektrische Leistung	kW	95	
thermischer Wirkungsgrad	%	56	
elektrischer Wirkungsgrad	%	30	
gesamter Wirkungsgrad	%	86	
Stromkennzahl	-	0,53	
Volllaststunden	h	6.000	
Energiebilanz			
Wärmelieferung BHKW	kWh/a	1.074.000	
Stromlieferung BHKW	kWh/a	570.000	
Brennstoffbedarf BHKW	kWh/a	1.908.000	
Eigenstromerzeugung	kWh/a	570.000	
Wärmenutzung	%	18,4	
Restwärmebedarf Flaschenwaschmaschine	kWh/a	0	
Kostenbetrachtung			
spezifische Investitionen BHKW	DM/kW _{el}	2.053	
Investitionen BHKW	DM	195.035	
Reparatur/Wartung BHKW (2,5 % der Stromerz.)	DM/a	14.250	
Wartung Gebäude	DM/a	150	
Versicherung (0,5% von Investitionskosten)	DM/a	975	
Betriebskosten, gesamt	DM/a	15.375	
spezifischer Gaspreis	Pf/kWh	3,5	
spezifischer Strompreis	Pf/kWh	17,7	
Brennstoffkosten BHKW	DM/a	66.780	
Endenergiekosten alt	DM/a	8.274	
Restwärmekosten	DM/a	0	
Wärmegeheimungskosten neu (inkl. Betriebskosten)	DM/a	82.155	
Kosteneinsparungen durch Eigenstromerzeugung	DM/a	100.890	
jährliche Minderausgaben	DM/a	27.009	
Wirtschaftlichkeitsbetrachtung			
Investitionskosten	DM	195.035	
jährliche Kosteneinsparungen	DM/a	27.009	
		Eigenfinanzierung	Fremdfinanzierung
Zinssatz bereinigt	%	3,14	7,07
Amortisationszeit, statisch	a	17,10	17,10
Amortisationszeit, dynamisch	a	8,32	10,46
Emissionen			
Schadstoff	Ist-Zustand	Einsparung durch Maßnahme	Verbleibende Emissionen
	kg/a	kg/a	kg/a
CO ₂	1.337.707,0	126.765,2	1.210.941,8
CO	468,4	-118,0	586,4
SO ₂	790,3	355,6	434,6
NO _x	974,1	13,7	960,4
NOMVOC	114,3	-22,6	136,9
Staub	76,7	38,7	38,0

**Tabelle A.3 Daten- und Berechnungsunterlagen zur Energieeinsparmaßnahme:
„Gas-Otto-BHKW, Variante III“**

Maßnahme: Einsatz eines Gas-Otto-BHKW, Variante III (Flaschenwaschmaschine)			
Ist-Zustand			
Nutzenergiebedarf Prozeßwärme (Aufheizen)	kWh/a	89.440	
Nutzenergiebedarf Prozeßwärme (Betrieb)	kWh/a	107.672	
Endenergiebedarf (Prozeßwärme)	kWh/a	229.200	
Laufzeit Betrieb	h/a	626	
durchschnittl. therm. Leistung	kW	172	
Endenergiepreis	Pf/kWh	3,61	
jährliche Kosten	DM/a	8.274	
elektrischer Strombedarf (gesamt)	kWh/a	889.000	
spezifischer Strompreis	Pf/kWh	17,7	
Maßnahme: Gas-Otto-BHKW - 112 kW_e			
Feuerungswärmeleistung	kW	345	
thermische Leistung	kW	180	
elektrische Leistung	kW	112	
thermischer Wirkungsgrad	%	52	
elektrischer Wirkungsgrad	%	32	
gesamter Wirkungsgrad	%	85	
Stromkennzahl	-	0,62	
Volllaststunden	h	6.000	
Energiebilanz			
Wärmelieferung BHKW	kWh/a	1.080.000	
Stromlieferung BHKW	kWh/a	672.000	
Brennstoffbedarf BHKW	kWh/a	2.070.000	
Eigenstromerzeugung	kWh/a	672.000	
Wärmenutzung	%	18,3	
Restwärmebedarf Flaschenwaschmaschine	kWh/a	0	
Kostenbetrachtung			
spezifische Investitionen BHKW	DM/kW _{eI}	1.920	
Investitionen BHKW	DM	215.040	
Reparatur/Wartung BHKW (2,5 % der Stromerz.)	DM/a	16.800	
Wartung Gebäude	DM/a	150	
Versicherung (0,5% von Investitionskosten)	DM/a	1.075	
Betriebskosten, gesamt	DM/a	18.025	
spezifischer Gaspreis	Pf/kWh	3,5	
spezifischer Strompreis	Pf/kWh	17,7	
Brennstoffkosten BHKW	DM/a	72.450	
Endenergiekosten alt	DM/a	8.274	
Restwärmekosten	DM/a	0	
Wärmegestehungskosten neu (inkl. Betriebskosten)	DM/a	90.475	
Kosteneinsparungen durch Eigenstromerzeugung	DM/a	118.944	
jährliche Minderausgaben	DM/a	36.743	
Wirtschaftlichkeitsbetrachtung			
Investitionskosten	DM	215.040	
jährliche Kosteneinsparungen	DM/a	36.743	
		Eigenfinanzierung	Fremdfinanzierung
Zinssatz bereinigt	%	3,14	7,07
Amortisationszeit, statisch	a	11,01	11,01
Amortisationszeit, dynamisch	a	6,57	7,82
Emissionen			
Schadstoff	Ist-Zustand	Einsparung durch Maßnahme	Verbleibende Emissionen
	kg/a	kg/a	kg/a
CO ₂	1.337.707,0	175.913,5	1.161.793,5
CO	468,4	-127,9	596,3
SO ₂	790,3	395,6	394,7
NO _x	974,1	41,8	932,3
NOMVOC	114,3	-25,0	139,3
Staub	76,7	45,7	31,0

**Tabelle A.4 Daten- und Berechnungsunterlagen zur Energieeinsparmaßnahme:
„Gas-Otto-BHKW, Variante IV“**

Maßnahme: Einsatz eines Gas-Otto-BHKW, Variante IV (Flaschenwaschmaschine)			
Ist-Zustand			
Nutzenergiebedarf Prozeßwärme (Aufheizen)	kWh/a	89.440	
Nutzenergiebedarf Prozeßwärme (Betrieb)	kWh/a	107.672	
Endenergiebedarf (Prozeßwärme)	kWh/a	229.200	
Laufzeit Betrieb	h/a	626	
durchschnittl. therm. Leistung	kW	172	
Endenergiepreis	Pf/kWh	3,61	
jährliche Kosten	DM/a	8.274	
elektrischer Strombedarf (gesamt)	kWh/a	889.000	
spezifischer Strompreis	Pf/kWh	17,7	
Maßnahme: Gas-Otto-BHKW - 143 kW_e			
Feuerungswärmeleistung	kW	471	
thermische Leistung	kW	271	
elektrische Leistung	kW	143	
thermischer Wirkungsgrad	%	58	
elektrischer Wirkungsgrad	%	30	
gesamter Wirkungsgrad	%	88	
Stromkennzahl	-	0,53	
Volllaststunden	h	5.000	
Energiebilanz			
Wärmelieferung BHKW	kWh/a	1.355.000	
Stromlieferung BHKW	kWh/a	715.000	
Brennstoffbedarf BHKW	kWh/a	2.355.000	
Eigenstromerzeugung	kWh/a	715.000	
Wärmenutzung	%	14,5	
Restwärmebedarf Flaschenwaschmaschine	kWh/a	0	
Kostenbetrachtung			
spezifische Investitionen BHKW	DM/kW _{eI}	1.643	
Investitionen BHKW	DM	234.949	
Reparatur/Wartung BHKW (2,5 % der Stromerz.)	DM/a	17.875	
Wartung Gebäude	DM/a	150	
Versicherung (0,5% von Investitionskosten)	DM/a	1.175	
Betriebskosten, gesamt	DM/a	19.200	
spezifischer Gaspreis	Pf/kWh	3,5	
spezifischer Strompreis	Pf/kWh	17,7	
Brennstoffkosten BHKW	DM/a	82.425	
Endenergiekosten alt	DM/a	8.274	
Restwärmekosten	DM/a	0	
Wärmegeheimungskosten neu (inkl. Betriebskosten)	DM/a	101.625	
Kosteneinsparungen durch Eigenstromerzeugung	DM/a	126.555	
jährliche Minderausgaben	DM/a	33.204	
Wirtschaftlichkeitsbetrachtung			
Investitionskosten	DM	234.949	
jährliche Kosteneinsparungen	DM/a	33.204	
		Eigenfinanzierung	Fremdfinanzierung
Zinssatz bereinigt	%	3,14	7,07
Amortisationszeit, statisch	a	16,31	16,31
Amortisationszeit, dynamisch	a	8,13	10,16
Emissionen			
Schadstoff	Ist-Zustand	Einsparung durch Maßnahme	Verbleibende Emissionen
	kg/a	kg/a	kg/a
CO ₂	1.337.707,0	152.597,0	1.185.110,0
CO	468,4	-166,9	635,3
SO ₂	790,3	412,1	378,1
NO _x	974,1	14,5	959,6
NOMVOC	114,3	-31,7	146,0
Staub	76,7	48,4	28,2

**Tabelle A.5 Daten- und Berechnungsunterlagen zur Energieeinsparmaßnahme:
„Gas-Otto-BHKW, Variante V“**

Maßnahme: Einsatz eines Diesel-BHKW, Variante V (Flaschenwaschmaschine)			
Ist-Zustand			
Nutzenergiebedarf Prozeßwärme (Aufheizen)	kWh/a	89.440	
Nutzenergiebedarf Prozeßwärme (Betrieb)	kWh/a	107.672	
Endenergiebedarf (Prozeßwärme)	kWh/a	229.200	
Laufzeit Betrieb	h/a	626	
durchschnittl. therm. Leistung	kW	172	
Endenergiepreis	Pf/kWh	3,61	
jährliche Kosten	DM/a	8.274	
elektrischer Strombedarf (gesamt)	kWh/a	889.000	
spezifischer Strompreis	Pf/kWh	17,7	
Maßnahme: Diesel-BHKW - 65 kW_{el}			
Feuerungswärmeleistung	kW	172	
thermische Leistung	kW	83	
elektrische Leistung	kW	65	
thermischer Wirkungsgrad	%	48	
elektrischer Wirkungsgrad	%	38	
gesamter Wirkungsgrad	%	86	
Stromkennzahl	-	0,78	
Volllaststunden	h	6.000	
Energiebilanz			
Wärmelieferung BHKW	kWh/a	498.000	
Stromlieferung BHKW	kWh/a	390.000	
Brennstoffbedarf BHKW	kWh/a	1.032.000	
Eigenstromerzeugung	kWh/a	390.000	
Wärmenutzung	%	19,1	
Restwärmebedarf Flaschenwaschmaschine	kWh/a	101.994	
Kostenbetrachtung			
spezifische Investitionen BHKW	DM/kW _{el}	2.077	
Investitionen BHKW	DM	135.005	
Reparatur/Wartung BHKW (2,3 % der Stromerz.)	DM/a	8.970	
Wartung Gebäude	DM/a	150	
Versicherung (0,5% von Investitionskosten)	DM/a	675	
Betriebskosten, gesamt	DM/a	9.795	
spezifischer Heizölpreis	Pf/kWh	2,9	
spezifischer Strompreis	Pf/kWh	17,7	
Brennstoffkosten BHKW	DM/a	29.928	
Endenergiekosten alt	DM/a	8.274	
Restwärmekosten	DM/a	4.281	
Wärmegestehungskosten neu (inkl. Betriebskosten)	DM/a	39.723	
Kosteneinsparungen durch Eigenstromerzeugung	DM/a	69.030	
jährliche Minderausgaben	DM/a	33.300	
Wirtschaftlichkeitsbetrachtung			
Investitionskosten	DM	135.005	
jährliche Kosteneinsparungen	DM/a	33.300	
		Eigenfinanzierung	Fremdfinanzierung
Zinssatz bereinigt	%	3,14	7,07
Amortisationszeit, statisch	a	6,00	6,00
Amortisationszeit, dynamisch	a	4,40	4,94
Emissionen			
Schadstoff	Ist-Zustand	Einsparung durch Maßnahme	Verbleibende Emissionen
	kg/a	kg/a	kg/a
CO ₂	1.337.707,0	45.643,9	1.292.063,2
CO	468,4	9,6	458,8
SO ₂	790,3	-142,9	933,2
NO _x	974,1	39,9	934,2
NOMVOC	114,3	-39,3	153,6
Staub	76,7	16,3	60,4

**Tabelle A.6 Daten- und Berechnungsunterlagen zur Energieeinsparmaßnahme:
„Gas-Otto-BHKW, Variante VI“**

Maßnahme: Einsatz eines Diesel-BHKW, Variante VI (Flaschenwaschmaschine)			
Ist-Zustand			
Nutzenergiebedarf Prozeßwärme (Aufheizen)	kWh/a	89.440	
Nutzenergiebedarf Prozeßwärme (Betrieb)	kWh/a	107.672	
Endenergiebedarf (Prozeßwärme)	kWh/a	229.200	
Laufzeit Betrieb	h/a	626	
durchschnittl. therm. Leistung	kW	172	
Endenergiepreis	Pf/kWh	3,61	
jährliche Kosten	DM/a	8.274	
elektrischer Strombedarf (gesamt)	kWh/a	889.000	
spezifischer Strompreis	Pf/kWh	17,7	
Maßnahme: Diesel-BHKW - 98 kW_{el}			
Feuerungswärmeleistung	kW	254	
thermische Leistung	kW	122	
elektrische Leistung	kW	98	
thermischer Wirkungsgrad	%	48	
elektrischer Wirkungsgrad	%	39	
gesamter Wirkungsgrad	%	87	
Stromkennzahl	-	0,80	
Volllaststunden	h	6.000	
Energiebilanz			
Wärmelieferung BHKW	kWh/a	732.000	
Stromlieferung BHKW	kWh/a	588.000	
Brennstoffbedarf BHKW	kWh/a	1.524.000	
Eigenstromerzeugung	kWh/a	588.000	
Wärmenutzung	%	19,1	
Restwärmebedarf Flaschenwaschmaschine	kWh/a	57.300	
Kostenbetrachtung			
spezifische Investitionen BHKW	DM/kW _{el}	1.531	
Investitionen BHKW	DM	150.038	
Reparatur/Wartung BHKW (2,3 % der Stromerzg.)	DM/a	13.524	
Wartung Gebäude	DM/a	150	
Versicherung (0,5% von Investitionskosten)	DM/a	750	
Betriebskosten, gesamt	DM/a	14.424	
spezifischer Heizölpreis	Pf/kWh	2,9	
spezifischer Strompreis	Pf/kWh	17,7	
Brennstoffkosten BHKW	DM/a	44.196	
Endenergiekosten alt	DM/a	8.274	
Restwärmekosten	DM/a	2.405	
Wärmegeheimungskosten neu (inkl. Betriebskosten)	DM/a	58.620	
Kosteneinsparungen durch Eigenstromerzeugung	DM/a	104.076	
jährliche Minderausgaben	DM/a	51.325	
Wirtschaftlichkeitsbetrachtung			
Investitionskosten	DM	150.038	
jährliche Kosteneinsparungen	DM/a	51.325	
		Eigenfinanzierung	Fremdfinanzierung
Zinssatz bereinigt	%	3,14	7,07
Amortisationszeit, statisch	a	3,82	3,82
Amortisationszeit, dynamisch	a	3,11	3,39
Emissionen			
Schadstoff	Ist-Zustand	Einsparung durch Maßnahme	Verbleibende Emissionen
	kg/a	kg/a	kg/a
CO ₂	1.337.707,0	76.930,4	1.260.776,6
CO	468,4	15,8	452,6
SO ₂	790,3	-206,7	997,0
NO _x	974,1	65,5	908,6
NOMVOC	114,3	-57,9	172,2
Staub	76,7	24,9	51,7

**Tabelle A.7 Daten- und Berechnungsunterlagen zur Energieeinsparmaßnahme:
„Gas-Otto-BHKW, Variante VII“**

Maßnahme: Einsatz eines Diesel-BHKW, Variante VII (Flaschenwaschmaschine)			
Ist-Zustand			
Nutzenergiebedarf Prozeßwärme (Aufheizen)	kWh/a	89.440	
Nutzenergiebedarf Prozeßwärme (Betrieb)	kWh/a	107.672	
Endenergiebedarf (Prozeßwärme)	kWh/a	229.200	
Laufzeit Betrieb	h/a	626	
durchschnittl. therm. Leistung	kW	172	
Endenergiepreis	Pf/kWh	3,61	
jährliche Kosten	DM/a	8.274	
elektrischer Strombedarf (gesamt)	kWh/a	889.000	
spezifischer Strompreis	Pf/kWh	17,7	
Maßnahme: Diesel-BHKW - 167 kW_{el}			
Feuerungswärmeleistung	kW	435	
thermische Leistung	kW	205	
elektrische Leistung	kW	167	
thermischer Wirkungsgrad	%	47	
elektrischer Wirkungsgrad	%	38	
gesamter Wirkungsgrad	%	86	
Stromkennzahl	-	0,81	
Volllaststunden	h	4.250	
Energiebilanz			
Wärmelieferung BHKW	kWh/a	871.250	
Stromlieferung BHKW	kWh/a	709.750	
Brennstoffbedarf BHKW	kWh/a	1.848.750	
Eigenstromerzeugung	kWh/a	709.750	
Wärmenutzung	%	22,6	
Restwärmebedarf Flaschenwaschmaschine	kWh/a	0	
Kostenbetrachtung			
spezifische Investitionen BHKW	DM/kW _{el}	1.138	
Investitionen BHKW	DM	190.046	
Reparatur/Wartung BHKW (2,3 % der Stromerzg.)	DM/a	16.324	
Wartung Gebäude	DM/a	150	
Versicherung (0,5% von Investitionskosten)	DM/a	950	
Betriebskosten, gesamt	DM/a	17.424	
spezifischer Heizölpreis	Pf/kWh	2,9	
spezifischer Strompreis	Pf/kWh	17,7	
Brennstoffkosten BHKW	DM/a	53.614	
Endenergiekosten alt	DM/a	8.274	
Restwärmekosten	DM/a	0	
Wärmegestehungskosten neu (inkl. Betriebskosten)	DM/a	71.038	
Kosteneinsparungen durch Eigenstromerzeugung	DM/a	125.626	
jährliche Minderausgaben	DM/a	62.862	
Wirtschaftlichkeitsbetrachtung			
Investitionskosten	DM	190.046	
jährliche Kosteneinsparungen	DM/a	62.862	
		Eigenfinanzierung	Fremdfinanzierung
Zinssatz bereinigt	%	3,14	7,07
Amortisationszeit, statisch	a	3,99	3,99
Amortisationszeit, dynamisch	a	3,23	3,52
Emissionen			
Schadstoff	Ist-Zustand	Einsparung durch Maßnahme	Verbleibende Emissionen
	kg/a	kg/a	kg/a
CO ₂	1.337.707,0	98.266,0	1.239.441,0
CO	468,4	32,3	436,1
SO ₂	790,3	-233,5	1.023,8
NO _x	974,1	82,8	891,3
NOMVOC	114,3	-68,0	182,3
Staub	76,7	30,1	46,6

A 3. Berechnungs- und Datenblätter der vorgeschlagenen Maßnahmen im Anwendungsbereich „Kraft“

**Tabelle A.8 Daten- und Berechnungsunterlagen zur Energieeinsparmaßnahme:
„Einsatz eines Lastmanagementsystems“**

Maßnahme: Einsatz eines Lastmanagementsystems			
Ist-Zustand			
anrechenbare Leistungsspitze (Dreimonatsmittel)	kW	282	
Leistungspreis	DM/kW	249,00	
Stromverbrauch	kWh	889.000	
Arbeitspreis	Pf/kWh	9,88	
Kostenbilanz			
Verbrauchskosten	DM/a	87.833	
Leistungskosten	DM/a	70.218	
Anteil Verbrauchskosten	%	56	
Anteil Leistungskosten	%	44	
Maßnahme: Lastmanagement			
neue anrechenbare Leistungsspitze	kW	252	
Investitionskosten	DM	25.000	
neue Leistungskosten	DM	62.748	
Anteil Verbrauchskosten, neu	%	58	
Anteil Leistungskosten, neu	%	42	
Kostenreduktion	DM	7.470	

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung			
Investitionskosten	DM	25.000,00	
Endenergieeinsparung	kWh/a	-	
Endenergiepreis	Pf/kWh	17,7	
Kosteneinsparung durch Reduktion der Leistungsspitzen	DM/a	7.470,00	
Betriebskosten für zusätzlichen Energieeinsatz	DM/a	0,00	
Betriebskosten für Wartung und Reparatur etc.	DM/a	0,00	
		Eigenfinanzierung	Fremdfinanzierung
Zinssatz bereinigt	%	3,14	7,07
Amortisationszeit, statisch	a	4,6	4,6
Amortisationszeit, dynamisch	a	3,6	4,0

Emissionen			
Schadstoff	Ist-Zustand	Einsparung durch Maßnahme	Verbleibende Emissionen
	kg/a	kg/a	kg/a
CO ₂	1.337.707,0	0,0	1.337.707,0
CO	468,4	0,0	468,4
SO ₂	790,3	0,0	790,3
NO _x	974,1	0,0	974,1
NOMVOC	114,3	0,0	114,3
Staub	76,7	0,0	76,7

**Tabelle A.9 Daten- und Berechnungsunterlagen zur Energieeinsparmaßnahme:
„Motoreinsatz (2,2 kW => 1,1 kW Neumotor)“**

Maßnahme: Motoreinsatz (2,2 kW => 1,1 kW-Neumotor)			
Ist-Zustand			
2-poliger Drehstrom-Kurzschlußläufer-Motor			
Nennleistung	kW	2,20	
Auslastung	kW	0,55	
jährliche Nutzungsdauer	h/a	2.000	
elektrischer Wirkungsgrad (etha alt)	%	66	
Maßnahme: Neuer Motor			
2-poliger Drehstrom-Kurzschlußläufer-Motor, neu			
Nennleistung	kW	1,10	
Auslastung	kW	0,55	
jährliche Nutzungsdauer	h/a	2.000	
elektrischer Wirkungsgrad (etha neu)	%	73	
Investitionskosten	DM	190	
Energiebilanz			
Stromeinsparung	kWh/a	160	
Erläuterung			
jährliche Nutzungsdauer	t_B		
elektrischer Wirkungsgrad alter Motor	η_{alt}		
elektrischer Wirkungsgrad neuer Motor	η_{neu}		
Auslastung	P_{Last}		
Stromeinsparung	$W = t_B \times P_{Last} \times (1/\eta_{alt} - 1/\eta_{neu})$		
Wirtschaftlichkeitsbetrachtung			
Investitionskosten	DM	190,00	
Endenergieeinsparung	kWh/a	160	
Endenergiepreis	Pf/kWh	17,7	
Kosteneinsparung durch Minderenergieverbrauch	DM/a	28,29	
Betriebskosten für zusätzlichen Energieeinsatz	DM/a	0,00	
Betriebskosten für Wartung und Reparatur etc.	DM/a	0,00	
		Eigenfinanzierung	Fremdfinanzierung
Zinssatz bereinigt	%	3,14	7,07
Amortisationszeit, statisch	a	14,5	14,5
Amortisationszeit, dynamisch	a	7,7	9,4
Emissionen			
Schadstoff	Ist-Zustand	Einsparung durch Maßnahme	Verbleibende Emissionen
	kg/a	kg/a	kg/a
CO ₂	1.337.707,01	128,6	1.337.578,42
CO	468,41	0,03	468,38
SO ₂	790,27	0,06	790,21
NO _x	974,09	0,09	974,01
NOMVOC	114,29	0,00	114,29
Staub	76,68	0,01	76,67

**Tabelle A.10 Daten- und Berechnungsunterlagen zur Energieeinsparmaßnahme:
„Motoreinsatz (2,2 kW => 1,1 kW Gebrauchtmotor)“**

Maßnahme: Motoreinsatz (2,2 kW => 1,1 kW-Gebrauchtmotor)			
Ist-Zustand			
2-poliger Drehstrom-Kurzschlußläufer-Motor			
Nennleistung	kW	2,20	
Auslastung	kW	0,55	
jährliche Nutzungsdauer	h/a	2.000	
elektrischer Wirkungsgrad (etha alt)	%	66	
Maßnahme: Neuer Motor			
2-poliger Drehstrom-Kurzschlußläufer-Motor, neu			
Nennleistung	kW	1,10	
Auslastung	kW	0,55	
jährliche Nutzungsdauer	h/a	2.000	
elektrischer Wirkungsgrad (etha neu)	%	73	
Investitionskosten	DM	100	
Energiebilanz			
Stromeinsparung	kWh/a	160	
Erläuterung			
jährliche Nutzungsdauer	t_B		
elektrischer Wirkungsgrad alter Motor	η_{alt}		
elektrischer Wirkungsgrad neuer Motor	η_{neu}		
Auslastung	P_{Last}		
Stromeinsparung	$W = t_B \times P_{Last} \times (1/\eta_{alt} - 1/\eta_{neu})$		
Wirtschaftlichkeitsbetrachtung			
Investitionskosten	DM	100,00	
Endenergieeinsparung	kWh/a	160	
Endenergiepreis	Pf/kWh	17,7	
Kosteneinsparung durch Minderenergieverbrauch	DM/a	28,29	
Betriebskosten für zusätzlichen Energieeinsatz	DM/a	0,00	
Betriebskosten für Wartung und Reparatur etc.	DM/a	0,00	
		Eigenfinanzierung	Fremdfinanzierung
Zinssatz bereinigt	%	3,14	7,07
Amortisationszeit, statisch	a	4,9	4,9
Amortisationszeit, dynamisch	a	3,8	4,2
Emissionen			
Schadstoff	Ist-Zustand	Einsparung durch Maßnahme	Verbleibende Emissionen
	kg/a	kg/a	kg/a
CO ₂	1.337.707,01	128,6	1.337.578,42
CO	468,41	0,03	468,38
SO ₂	790,27	0,06	790,21
NO _x	974,09	0,09	974,01
NOMVOC	114,29	0,00	114,29
Staub	76,68	0,01	76,67

**Tabelle A.11 Daten- und Berechnungsunterlagen zur Energieeinsparmaßnahme:
„Motoreinsatz (15 kW => 7,5 kW Neumotor)“**

Maßnahme: Motoreinsatz (15 kW => 7,5 kW-Neumotor)			
Ist-Zustand			
2-poliger Drehstrom-Kurzschlußläufer-Motor			
Nennleistung	kW	15,0	
Auslastung	kW	4,0	
jährliche Nutzungsdauer	h/a	2.000	
elektrischer Wirkungsgrad (etha alt)	%	80	
Maßnahme: Neuer Motor			
2-poliger Drehstrom-Kurzschlußläufer-Motor, neu			
Nennleistung	kW	7,5	
Auslastung	kW	4,0	
jährliche Nutzungsdauer	h/a	2.000	
elektrischer Wirkungsgrad (etha neu)	%	85	
Investitionskosten	DM	750	
Energiebilanz			
Stromersparung	kWh/a	588	
Erläuterung			
jährliche Nutzungsdauer	t_B		
elektrischer Wirkungsgrad alter Motor	η_{alt}		
elektrischer Wirkungsgrad neuer Motor	η_{neu}		
Auslastung	P_{Last}		
Stromersparung	$W = t_B \times P_{Last} \times (1/\eta_{alt} - 1/\eta_{neu})$		
Wirtschaftlichkeitsbetrachtung			
Investitionskosten	DM	750,00	
Endenergieersparung	kWh/a	588	
Endenergiepreis	Pf/kWh	17,7	
Kostensersparung durch Minderenergieverbrauch	DM/a	104,12	
Betriebskosten für zusätzlichen Energieeinsatz	DM/a	0,00	
Betriebskosten für Wartung und Reparatur etc.	DM/a	0,00	
		Eigenfinanzierung	Fremdfinanzierung
Zinssatz bereinigt	%	3,14	7,07
Amortisationszeit, statisch	a	17,0	17,0
Amortisationszeit, dynamisch	a	8,3	10,4
Emissionen			
Schadstoff	Ist-Zustand	Einsparung durch Maßnahme	Verbleibende Emissionen
	kg/a	kg/a	kg/a
CO ₂	1.337.707,01	473,3	1.337.233,73
CO	468,41	0,09	468,32
SO ₂	790,27	0,23	790,04
NO _x	974,09	0,33	973,76
NOMVOC	114,29	0,01	114,28
Staub	76,68	0,04	76,64

**Tabelle A.12 Daten- und Berechnungsunterlagen zur Energieeinsparmaßnahme:
„Motoreinsatz (15 kW => 7,5 kW Gebrauchtmotor)“**

Maßnahme: Motoreinsatz (15 kW => 7,5 kW-Gebrauchtmotor)			
Ist-Zustand			
2-poliger Drehstrom-Kurzschlußläufer-Motor			
Nennleistung	kW	15,0	
Auslastung	kW	4,0	
jährliche Nutzungsdauer	h/a	2.000	
elektrischer Wirkungsgrad (etha alt)	%	80	
Maßnahme: Neuer Motor			
2-poliger Drehstrom-Kurzschlußläufer-Motor, neu			
Nennleistung	kW	7,5	
Auslastung	kW	4,0	
jährliche Nutzungsdauer	h/a	2.000	
elektrischer Wirkungsgrad (etha neu)	%	85	
Investitionskosten	DM	550	
Energiebilanz			
Stromeinsparung	kWh/a	588	
Erläuterung			
jährliche Nutzungsdauer	t_B		
elektrischer Wirkungsgrad alter Motor	η_{alt}		
elektrischer Wirkungsgrad neuer Motor	η_{neu}		
Auslastung	P_{Last}		
Stromeinsparung	$W = t_B \times P_{Last} \times (1/\eta_{alt} - 1/\eta_{neu})$		
Wirtschaftlichkeitsbetrachtung			
Investitionskosten	DM	550,00	
Endenergieeinsparung	kWh/a	588	
Endenergiepreis	Pf/kWh	17,7	
Kosteneinsparung durch Minderenergieverbrauch	DM/a	104,12	
Betriebskosten für zusätzlichen Energieeinsatz	DM/a	0,00	
Betriebskosten für Wartung und Reparatur etc.	DM/a	0,00	
		Eigenfinanzierung	Fremdfinanzierung
Zinssatz bereinigt	%	3,14	7,07
Amortisationszeit, statisch	a	9,1	9,1
Amortisationszeit, dynamisch	a	5,9	6,8
Emissionen			
Schadstoff	Ist-Zustand	Einsparung durch Maßnahme	Verbleibende Emissionen
	kg/a	kg/a	kg/a
CO ₂	1.337.707,01	473,3	1.337.233,73
CO	468,41	0,09	468,32
SO ₂	790,27	0,23	790,04
NO _x	974,09	0,33	973,76
NOMVOC	114,29	0,01	114,28
Staub	76,68	0,04	76,64

**Tabelle A.13 Daten- und Berechnungsunterlagen zur Energieeinsparmaßnahme:
„Einsatz Frequenzumformer (2,2 kW Motor)“**

Maßnahme: Einsatz Frequenzumformer (2,2 kW Motor)			
Ist-Zustand			
2-poliger Drehstrom-Kurzschlußläufer-Motor			
Nennleistung	kW	2,2	
Auslastung	kW	0,8	
jährliche Nutzungsdauer	h/a	2.000	
elektrischer Wirkungsgrad etha	%	80	
Maßnahme: Regelung durch Frequenzumformer			
spezifische Investitionskosten	DM/kW	570	
Investitionskosten	DM	1.254	
Energiebilanz			
derzeitiger Strombedarf	kWh/a	1.600	
relative Stromersparung	%	15	
Stromeinsparung	kWh/a	240	
Wirtschaftlichkeitsbetrachtung			
Investitionskosten	DM	1.254,00	
Endenergieeinsparung	kWh/a	240	
Endenergiepreis	Pf/kWh	17,7	
Kosteneinsparung durch Minderenergieverbrauch	DM/a	42,48	
Betriebskosten für zusätzlichen Energieeinsatz	DM/a	0,00	
Betriebskosten für Wartung und Reparatur etc.	DM/a	0,00	
		Eigenfinanzierung	Fremdfinanzierung
Zinssatz bereinigt	%	3,14	7,07
Amortisationszeit, statisch	a	nicht berechenbar	nicht berechenbar
Amortisationszeit, dynamisch	a	85,0	nicht berechenbar
Emissionen			
Schadstoff	Ist-Zustand	Einsparung durch Maßnahme	Verbleibende Emissionen
	kg/a	kg/a	kg/a
CO ₂	1.337.707,01	193,1	1.337.513,91
CO	468,41	0,04	468,37
SO ₂	790,27	0,09	790,17
NO _x	974,09	0,13	973,96
NOMVOC	114,29	0,00	114,29
Staub	76,68	0,02	76,66

**Tabelle A.14 Daten- und Berechnungsunterlagen zur Energieeinsparmaßnahme:
„Einsatz Frequenzumformer (7,5 kW Motor)“**

Maßnahme: Einsatz Frequenzumformer (7,5 kW Motor)			
Ist-Zustand			
2-poliger Drehstrom-Kurzschlußläufer-Motor			
Nennleistung	kW	7,5	
Auslastung	kW	4,0	
jährliche Nutzungsdauer	h/a	2.000	
elektrischer Wirkungsgrad etha	%	80	
Maßnahme: Regelung durch Frequenzumformer			
spezifische Investitionskosten	DM/kW	283	
Investitionskosten	DM	2.123	
Energiebilanz			
derzeitiger Strombedarf	kWh/a	8.000	
relative Stromersparung	%	15	
Stromersparung	kWh/a	1.200	
Wirtschaftlichkeitsbetrachtung			
Investitionskosten	DM	2.122,50	
Endenergieersparung	kWh/a	1.200	
Endenergiepreis	Pf/kWh	17,7	
Kosteneinsparung durch Minderenergieverbrauch	DM/a	212,40	
Betriebskosten für zusätzlichen Energieeinsatz	DM/a	0,00	
Betriebskosten für Wartung und Reparatur etc.	DM/a	0,00	
		Eigenfinanzierung	Fremdfinanzierung
Zinssatz bereinigt	%	3,14	7,07
Amortisationszeit, statisch	a	49,8	49,8
Amortisationszeit, dynamisch	a	12,2	18,0
Emissionen			
Schadstoff	Ist-Zustand	Einsparung durch Maßnahme	Verbleibende Emissionen
	kg/a	kg/a	kg/a
CO ₂	1.337.707,01	965,5	1.336.741,51
CO	468,41	0,19	468,22
SO ₂	790,27	0,47	789,80
NO _x	974,09	0,67	973,42
NOMVOC	114,29	0,02	114,27
Staub	76,68	0,08	76,60

**Tabelle A.15 Daten- und Berechnungsunterlagen zur Energieeinsparmaßnahme:
„Einsatz Frequenzumformer (15 kW Motor)“**

Maßnahme: Einsatz Frequenzumformer (15 kW Motor)			
Ist-Zustand			
2-poliger Drehstrom-Kurzschlußläufer-Motor			
Nennleistung	kW	15,0	
Auslastung	kW	8,0	
jährliche Nutzungsdauer	h/a	2.000	
elektrischer Wirkungsgrad etha	%	80	
Maßnahme: Regelung durch Frequenzumformer			
spezifische Investitionskosten	DM/kW	253	
Investitionskosten	DM	3.795	
Energiebilanz			
derzeitiger Strombedarf	kWh/a	16.000	
relative Stromersparung	%	15	
Stromersparung	kWh/a	2.400	
Wirtschaftlichkeitsbetrachtung			
Investitionskosten	DM	3.795,00	
Endenergieersparung	kWh/a	2.400	
Endenergiepreis	Pf/kWh	17,7	
Kosteneinsparung durch Minderenergieverbrauch	DM/a	424,80	
Betriebskosten für zusätzlichen Energieeinsatz	DM/a	0,00	
Betriebskosten für Wartung und Reparatur etc.	DM/a	0,00	
		Eigenfinanzierung	Fremdfinanzierung
Zinssatz bereinigt	%	3,14	7,07
Amortisationszeit, statisch	a	31,3	31,3
Amortisationszeit, dynamisch	a	10,7	14,6
Emissionen			
Schadstoff	Ist-Zustand	Einsparung durch Maßnahme	Verbleibende Emissionen
	kg/a	kg/a	kg/a
CO ₂	1.337.707,01	1.931,0	1.335.776,01
CO	468,41	0,38	468,03
SO ₂	790,27	0,95	789,32
NO _x	974,09	1,35	972,75
NOMVOC	114,29	0,04	114,25
Staub	76,68	0,17	76,51

**A 4. Berechnungs- und Datenblätter der vorgeschlagenen Maßnahmen
im Anwendungsbereich „Beleuchtung“**

**Tabelle A.16 Daten- und Berechnungsunterlagen zur Energieeinsparmaßnahme:
„Einsatz eines Lichtsteuerungssystems“**

Maßnahme: Einsatz eines Lichtsteuerungssystems			
Ist-Zustand			
Spiegelrasterleuchten			
Anzahl der Lampen pro Leuchte	-	3	
Anzahl der Leuchten pro Raum (Labor)	-	6	
Anzahl der Leuchten pro Raum (Büro)	-	4	
Leistung je Lampe (inkl. Vorschaltgerät)	W	28	
installierte Leistung, gesamt	W	840	
durchschnittliche Beleuchtungsdauer (Labor)	h/a	2.000	
durchschnittliche Beleuchtungsdauer (Büro)	h/a	2.500	
Stromverbrauch, gesamt	kWh/a	1.848	
Stromkosten	DM/a	327	
Maßnahme: Lichtsteuerung			
durchschnittliche Energieeinsparung	%	20	
Endenergieeinsparung	kWh/a	370	
Stromkosteneinsparung	DM/a	65	
Investitionskosten (Lichtsteuerung mit Präsenzmelder)	DM	1.000	

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung			
Investitionskosten	DM	1.000,00	
Endenergieeinsparung	kWh/a	370	
Endenergiepreis	Pf/kWh	17,7	
Kosteneinsparung, gesamt	DM/a	65,42	
Betriebskosten für zusätzlichen Energieeinsatz	DM/a	0,00	
Betriebskosten für Wartung und Reparatur etc.	DM/a	0,00	
		Eigenfinanzierung	Fremdfinanzierung
Zinssatz bereinigt	%	3,14	7,07
Amortisationszeit, statisch	a	nicht berechenbar	nicht berechenbar
Amortisationszeit, dynamisch	a	21,2	nicht berechenbar

Emissionen			
Schadstoff	Ist-Zustand	Einsparung durch Maßnahme	Verbleibende Emissionen
	kg/a	kg/a	kg/a
CO ₂	1.337.707,01	297,37	1.337.409,64
CO	468,41	0,06	468,35
SO ₂	790,27	0,15	790,12
NO _x	974,09	0,21	973,89
NOMVOC	114,29	0,01	114,29
Staub	76,68	0,03	76,66