

Adressen:

Herausgeber:
Bundesamt für Konjunkturfragen (BfK)
Belpstrasse 53
3003 Bern
Tel.: 031/61 21 39
Fax: 031/61 20 57

Geschäftsstelle: RAVEL
c/o Amstein+Walthert AG
Leutschenbachstrasse 45
8050 Zürich
Tel.: 01/30591 11
Fax: 01/305 92 14

Ressortleiter: Daniel Spreng

Forschungsgruppe
Energieanalysen ETHZ
8092 Zürich
Tel.: 01/256 41 89
Fax: 01/251 21 72

Autoren: Frieder Wolfart
Thomas Bürki Anton Klaus
Ernst Basler & Partner AG
Zollikerstrasse 65
8702 Zollikon
Tel.: 01/395 11 11
Fax: 01/395 12 34

Diese Studie gehört zu einer Reihe von Untersuchungen, welche zu Handen des Impulsprogrammes RAVEL von Dritten erarbeitet wurde. Das Bundesamt für Konjunkturfragen und die von ihm eingesetzte Programmleitung geben die vorliegende Studie zur Veröffentlichung frei. Die inhaltliche Verantwortung liegt bei den Autoren und der zuständigen Ressortleitung.

Copyright Bundesamt für Konjunkturfragen
3003 Bern, Juni 1992

Auszugweiser Nachdruck unter Quellenangabe erlaubt. Zu beziehen bei der Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale, Bern (Best. Nr. 724.397.12.54 d)

Form. 724.397.12.54 d 7.92 1000 60734

RAVEL Materialien zu RAVEL

Materialien zu RAVEL

Kennwerte betrieblicher Prozessketten

Kurzfassung

Frieder Wolfart



Thomas Bürki
Anton Klaus

Impulsprogramm RAVEL
RAVEL - Materialien zu RAVEL

Bundesamt für Konjunkturfragen

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG	1
2. ZUSAMMENFASSUNG	3
3. DARSTELLUNG DER METHODIK	5
3.1 Überblick	5
3.2 Zieldefinition	7
3.2.1 Erkennen energetischer Schwachstellen	7
3.2.2 Erkennen von Faktoren, die den Energieverbrauch beeinflussen	8
3.2.3 Bewertung von Anlagen/Anlageteilen/Maschinen bei Neuanschaffung oder Sanierung	8
3.2.4 Optimale Belegung von Anlagen oder Maschinen	9
3.2.5 Optimale Betriebsorganisation	9
3.2.6 Betriebsüberwachung/Motivation der Mitarbeiter	10
3.2.7 Verursachergerechte Energiekostenverteilung	10
3.2.8 Vergleich mit anderen Betrieben	11
3.3 Systemabgrenzung	11
3.3.1 Welche Teile des Betriebes sollen einbezogen werden?	11
3.3.2 Kann/soll der betrachtete Prozess in Teile zerlegt werden?	12
3.3.3 Welche Energien sollen betrachtet werden?	12
3.3.4 Welcher Betriebszustand soll untersucht werden?	12
3.3.5 Häufigkeit der Messungen	13
3.4 Festlegung der Messgrößen	13
3.5 Festlegung der Bezugsgrößen	14
3.6 Erhebung der Daten	15
3.7 Auswertung der Messungen, Bildung und Interpretation von Kennwerten	15
3.7.1 Parameterdarstellung	15
3.7.2 Zeitreihen	16
3.7.3 Energieflussbild	16
3.8 Handeln	17
3.9 Erfahrungsaustausch	18

	Seite	
4.	DAS BEISPIEL KUNSTSTOFFSPRITZGIESSEN	19
4.1	Beschreibung des Herstellverfahrens/Stand des Wissens	19
4.2	Bildung und Zusammenstellung der Arbeitsgruppe	20
4.3	Zieldefinition	22
4.4	Die Eingrenzung auf den Prozess	23
4.5	Festlegung der Messgrößen	25
4.6	Die Wahl der Bezugsgrößen	26
4.7	Durchführung der Messungen an drei Maschinen	27
4.8	Bildung und Interpretation der Kennwerte	31
4.9	Umsetzung der Erkenntnisse	48
5.	DAS BEISPIEL BIERHERSTELLUNG	49
5.1	Beschreibung des Herstellverfahrens Stand des Wissens/Vorliegende Arbeiten/Kennziffern	49
5.1.1	Die Bedeutung der Brauereien für die Schweiz. Volkswirtschaft	49
5.1.2	Beschreibung des traditionellen Verfahrens zur Bierherstellung	49
5.1.3	Alternative Brauverfahren und -techniken	51
5.1.4	Stand des Wissens/vorliegende Arbeiten	51
5.2	Bildung und Zusammenstellung ab Arbeitsgruppe	52
5.3	Formulierung von zwei Zielen einer Energiekennzahl	53
5.4	Bestimmung von Gesamtkennzahlen	54
5.5	Kennzahlen im Bereich Lagerkeller	69
5.5.1	Analyse des Kälteverbrauchs "Gärkeller" aller Arbeitsgruppenmitglieder	78
5.6	Umsetzung der Erkenntnisse in der Arbeitsgruppe	86
5.7	Folgerungen	90
LITERATURVERZEICHNIS		

Kurzfassung

Kennwerte Betrieblicher Prozessketten

Das vorliegende Untersuchungsprojekt "Kennwerte industrieller Prozesse" wurde im Rahmen des Impulsprogrammes RAVEL durchgeführt. Das Ziel der Untersuchung war die Erarbeitung einer branchenunabhängigen Methode zur Ermittlung und Bewertung des Energieverbrauchs von betrieblichen Prozessen und Prozessketten mit Hilfe von Kennwerten.

Die ermittelten Kennwerte sollen die Basis für Quervergleiche sein und den Erfahrungsaustausch einzelner Unternehmen fördern. Durch diesen Vergleich können energetische Schwachstellen der Betriebe identifiziert und Möglichkeiten aufgezeigt werden, wie Energie sparsamer und rationeller eingesetzt werden kann. Nach der Durchführung von Energiesparmassnahmen lässt sich deren Erfolg dann mit Hilfe der Kennzahlen überprüfen.

Bei der Bildung der Kennwerte steht nicht die Genauigkeit im Vordergrund, sondern deren Praktikabilität. Die einzelnen Betriebe müssen ihre eigenen Kennwerte mit geringem Aufwand selbst erheben, berechnen und interpretieren können. Die Kennzahlen sollen sich weitgehend aus den vorhandenen betrieblichen Statistiken ableiten lassen, bei der Aufteilung von Produktionsverfahren in einzelne Produktionsschritte sollen möglichst allgemeingültige Abgrenzungen aufgegriffen werden.

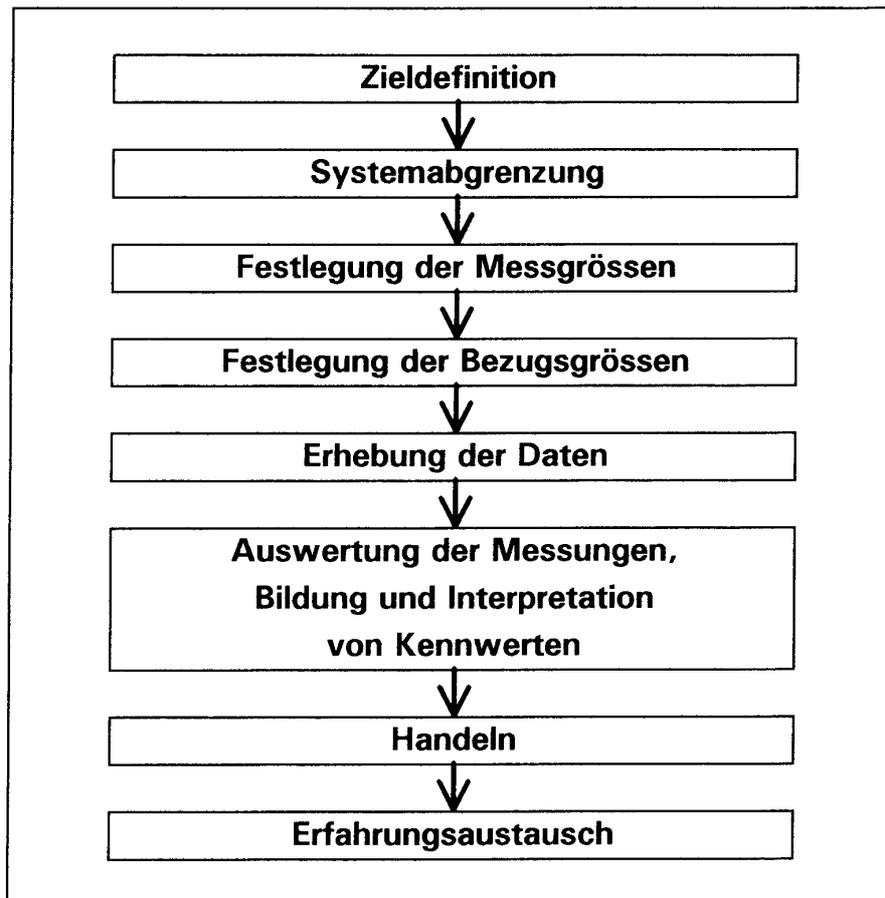
Um die Verwendbarkeit der Methode in der Praxis zu gewährleisten wurde diese beispielhaft in zwei industriellen Branchen angewendet. Die beiden untersuchten Branchen waren die Bierherstellung und das Kunststoffspritzgiessen. In den beiden Branchen wurden Arbeitsgruppen zusammengestellt, die sich regelmässig trafen und das Projekt begleiteten. Bei einigen Firmen wurden zur Erprobung der Methode exemplarisch Daten erhoben und Kennwerte gebildet.

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse wurden bei allen beteiligten Firmen ein verstärktes Energiebewusstsein geschaffen und zahlreiche Massnahmen zur rationellen Energieverwendung geplant und zum Teil bereits realisiert. Die Arbeitsgruppen bestehen weiter und intensivieren den Erfahrungsaustausch über Energiekennzahlen.

Im folgenden wird kurz die Methode umrissen und anschliessend einige interessante Ergebnisse aus der Branche Bierbrauereien vorgestellt.

DARSTELLUNG DER METHODIK

Die vorgeschlagene Methode zur Energieanalyse dient der Bewertung einzelner Herstellungsprozesse oder deren Teile mit geeigneten Kennwerten. Aufgrund der komplexen Problemstellung und den oben dargelegten Grundsätzen wird bei der Bildung von Kennwerten ein schrittweises und systematisches Vorgehen nach dem folgenden Schema angewendet:



Figur 1: Methodisches Vorgehen zur Bildung von Kennwerten betrieblicher Prozesse

Zieldefinition - zuerst Denken - dann Messen

Der erste Schritt bei der Bildung von Kennzahlen ist die Formulierung von konkreten Fragen, welche beantwortet werden sollen. Der Nutzen, der durch die Beantwortung der Fragen erwartet wird, sollte grob abgeschätzt werden, um den möglichen Mess-, Auswerte- und Interpretationsaufwand ableiten zu können. Die Zielformulierung ist Voraussetzung für die folgenden Schritte.

Einige mögliche Ziele von Energieanalysen sind:

- * Erkennen energetischer Schwachstellen des Betriebes
- * Erkennen von Faktoren, die den Energieverbrauch beeinflussen
- * Bewertung von Anlagen/Anlageteilen/Maschinen bei der Neuanschaffung oder Sanierung
- * Optimale Belegung von Anlagen oder Maschinen
- * Optimale Betriebsorganisation
- * Betriebsüberwachung/Motivation der Mitarbeiter
- * Verursachergerechte Energiekostenverteilung
- * Vergleich mit anderen Betrieben

Systemabgrenzung

Um eine genau definierte Aussage über die Energieflüsse zu erhalten, ist eine Systemabgrenzung nötig. Es soll nur untersucht werden, was der Beantwortung der gestellten Fragen (Zieldefinition) dient. Je näher man die Energieströme beim Verbraucher misst, desto weniger Störgrößen beeinflussen die Messungen und desto leichter lassen sich die Ergebnisse interpretieren. Vereinfachungen und Vernachlässigungen müssen vorgenommen werden, sollen aber bewusst erfolgen.

Die wichtigsten Punkte, die bei der Systemabgrenzung entschieden werden müssen sind:

- * Welche Teile des Betriebes sollen einbezogen werden?
- * Kann/soll der betrachtete Prozess in Teile zerlegt werden?
- * Welche Energien sollen betrachtet werden?
- * Welcher Betriebszustand soll untersucht werden?
- * Häufigkeit der Messungen

Festlegung der Messgrößen

Es gilt der Grundstz: So wenig wie möglich messen. Oft lassen sich die fraglichen Werte aus bekannten Größen ableiten, oder es ist möglich mit wenig Messungen sowie etwas Überlegung und Rechenarbeit die gewünschte Information zu bekommen.

Die möglichen Messstellen werden durch die betrieblichen Gegebenheiten bestimmt. Daher ist die genaue Kenntnis der Energieumwandlung- und Verteilanlagen erforderlich. Gegebenenfalls müssen zunächst geeignete Pläne und Übersichten erstellt werden.

Festlegen der Bezugsgrößen

Kennwerte werden gebildet, indem die Messgröße (z.B. Energieverbrauch einer Periode) durch eine Bezugsgröße (z.B. Anzahl gefertigte Teile während dieser Periode) dividiert wird. Die richtige Wahl der Bezugsgröße ist dafür entscheidend, ob die in der Zieldefinition gestellten Fragen beantwortet werden können.

Die Bezugsgröße muss sich ohne grossen Aufwand ermitteln lassen. Nach Möglichkeit sollten daher Größen gewählt werden, die ohnehin durch die betriebliche Statistik erfasst werden.

Durchführung der Messungen

Bei der Durchführung von Einzelmessungen müssen alle prozessbestimmenden Parameter und die zur Messzeit herrschenden Randbedingungen möglichst genau gestgehalten werden, so dass später die Messung richtig interpretiert werden kann.

Auswertung der Messungen, Interpretation und Bildung von Kennwerten

Bereits vor der Messung sollte die Methode der Auswertung der Messergebnisse feststehen. Die Messergebnisse sind so aufzubereiten, dass sie hinsichtlich der gestellten Fragen interpretiert werden können. Hierzu eignen sich vor allem grafische Darstellungen.

Handeln

Den innerbetrieblichen Abschluss bildet die Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse. Die identifizierten Möglichkeiten, wie Energie im Prozess rationeller eingesetzt werden kann, müssen in entsprechendes Handeln münden. Hierzu sind die notwendigen Kompetenzen und Verantwortlichkeiten zu schaffen. Ebenso müssen effiziente Kontrollinstrumente bereitgestellt werden, damit der Erfolg der Massnahmen im nachhinein kontrolliert werden kann.

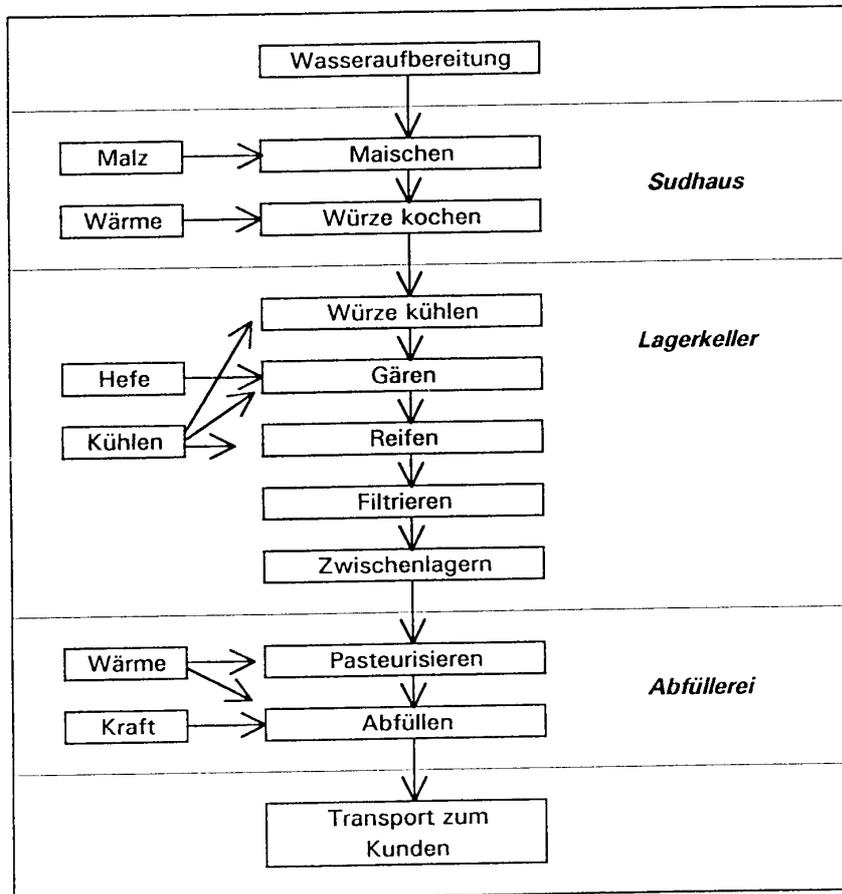
Erfahrungsaustausch

Durch den Erfahrungsaustausch zwischen Unternehmen der gleichen Branche können die gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen beim rationellen Einsatz von Energie verbreitet werden und so die Effizienz und Innovationskraft der am Erfahrungsaustausch beteiligten Firmen steigern. Voraussetzung für einen Vergleich ist, dass die beteiligten Firmen ihre Kennzahlen auf die gleiche Art und Weise ermitteln, das heisst, dieselben Systemabgrenzungen und Mess- und Bezugsgrössen wählen.

DAS BEISPIEL BIERHERSTELLUNG

Die Bierherstellung ist ein energieintensiver Prozess, der bei allen Brauereien in etwa nach dem in Figur 2 dargestellten Schema abläuft:

Malz wird mit warmem Wasser eingemaischt (= gemischt) und stufenweise erwärmt. Die unlöslichen Malzbestandteile (Treber) werden abgetrennt und die so entstandene Maische wird unter Beigabe von Hopfen in der Würzepfanne gekocht, wobei ca. 10 % der Maische verdampft werden. Die Kochzeit und Temperatur variiert je nach verwendetem Kochsystem. In der Regel beträgt der Zeitbedarf zur Würzereibereitung 6 - 8 Stunden. Das Endprodukt des Kochprozesses, die Ausschlagwürze (AW), wird auf 5-6 °C abgekühlt und nach dem Zusetzen von Hefe in Gärtanks vergoren. Hier muss die anfallende Gärwärme abgeführt werden. Nach etwa 7 Tagen ist die Hauptgärung beendet und das sogenannte Jungbier wird in Lagertanks umgepumpt. Die Nachgärung und Reifung in diesen Lagertanks dauert etwa 6 - 8 Wochen. Danach wird das so erhaltene Bier filtriert, eventuell stabilisiert, pasteurisiert und anschließend abgefüllt und verkauft.



Figur 2: Schematische Darstellung der Bierherstellung

Nach einer ausführlichen Diskussion in der Arbeitsgruppe "Brauereien" wurden von den teilnehmenden acht Firmen zwei Ziele von Kennwerten formuliert:

1) Bewertung Gesamtenergie. Durch geeignete Kennwerte sollte jede Brauerei in die Lage versetzt werden, die Effizienz ihres Energieeinsatzes grob zu beurteilen. Durch Vergleich und Diskussion mit den anderen Brauereien sollten Sparmöglichkeiten herausgefunden werden. Als Rahmenbedingung wurden festgelegt, dass nur vorhandene Daten und Statistiken ausgewertet werden sollten.

2) Spezielle Kennwerte zur Bewertung des Strom- und Kälteverbrauchs im Bereich Lagerkeller. Auch hier sollten durch einen Vergleich Sparmöglichkeiten identifiziert werden.

Bestimmung der Gesamtenergiekennwerte (Brennstoffe und Elektrizität)

Im Hinblick auf die vorgegebenen Ziele und unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen (keine Messungen, nur Auswertung vorhandener Unterlagen und Statistiken) wurde die Systemabgrenzung durchgeführt, aufgrund derer die Mess- und Bezugswerte festgelegt wurden. Dies führte zu den folgenden Definitionen und Abgrenzungen:

- Es wurde nur der Verbrauch von Brennstoffen und Elektrizität betrachtet. Treibstoffe blieben unberücksichtigt.
- Es wurden die Gesamtenergieverbräuche der ganzen Brauereien inklusive aller Hilfs- und Nebenbetriebe erfasst.
- Die Energieverbrauchswerte und die Produktionszahlen wurden monatlich erfasst.

Die benötigten Daten wurden mit einem Fragebogen erhoben, der an die Brauereien verschickt wurde. Die Fragebogen wurden ausgewertet, die entsprechenden Kennwerte berechnet. Einige Beispiele sind in den folgenden Figuren dargestellt.

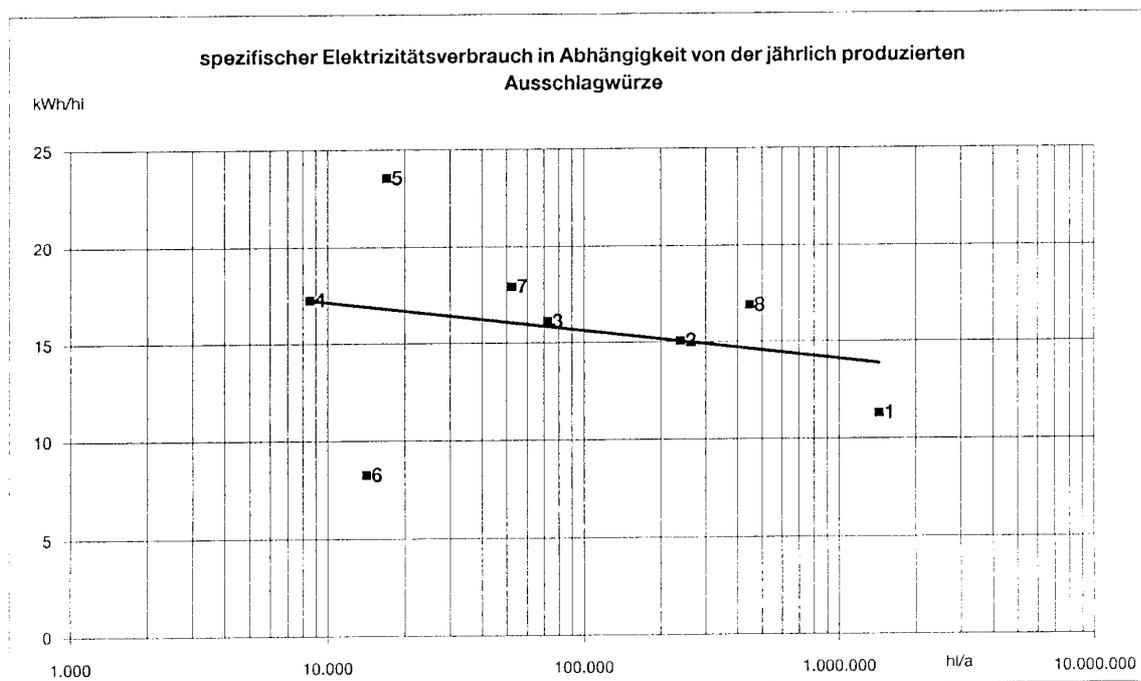
Figur 3: Die spezifischen Kennwerte (Jahresdurchschnittswerte) schwanken zwischen 8 und 24 kWh/hl AW. Tendenziell ist eine Abnahme des spezifischen Wertes mit zunehmender Grösse der Brauerei zu erkennen, einzelne Werte weichen jedoch stark vom "Erwartungswert" ab.

Die Brauerei 6 hat trotz ihres geringen Ausstosses den tiefsten Wert. Dies ist zum Teil auf die folgenden Ursachen zurückzuführen:

- die Kältemaschinen sind modern
- die Kondensatoren werden mit 10° C kühlem Wasser gekühlt
- die Lagerung erfolgt in "natürlich kaltem" Felskeller

Brauerei 1 hat einen sehr günstigen Wert, obwohl diese Brauerei über einen Brüdenverdichter verfügt (elektrisch betriebene Anlage zur Wärmerückgewinnung aus den Dampf schwaden, die bei m Kochen entstehen). Der günstige spezifische Wert ist zum Teil auf die moderne technische Ausstattung dieser Brauerei und zum anderen Teil auf deren hohe Auslastung zurückzuführen.

Brauerei 8 liegt vergleichsweise hoch, was zum einen auf die ungünstige Kälteerzeugung und den Lagerkeller zurückzuführen ist und zum anderen auf die grosse Menge alkoholfreier Getränke, die den Stromverbrauch beeinflusst ohne in der Bezugsgrösse berücksichtigt zu sein. Brauerei 5 liegt erheblich über dem "Erwartungswert", was auf den Einsatz von Nachtstrom zur Brauwassererwärmung zurückzuführen ist.

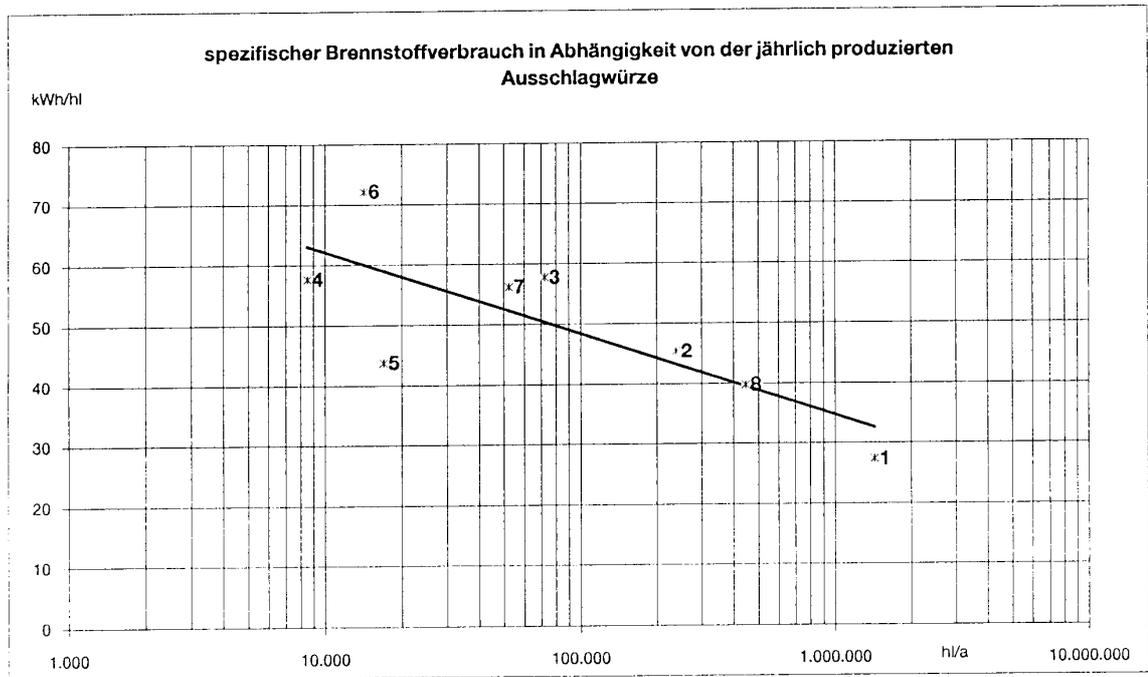


führen ist.

Figur 3: Spezifischer Elektrizitätsverbrauch in Abhängigkeit von der produzierten Ausschlagwürze

Figur 4: Hier schwanken die spezifischen Werte zwischen 27 und 72 kWh/hl AW. Am günstigsten liegt die Brauerei 1, was auf die Brüdenverdichtung zurückzuführen ist. Der hohe Kennwert von Brauerei 6 ist auf einen Nebenbetrieb zurückzuführen, der mit Wärme versorgt wird.

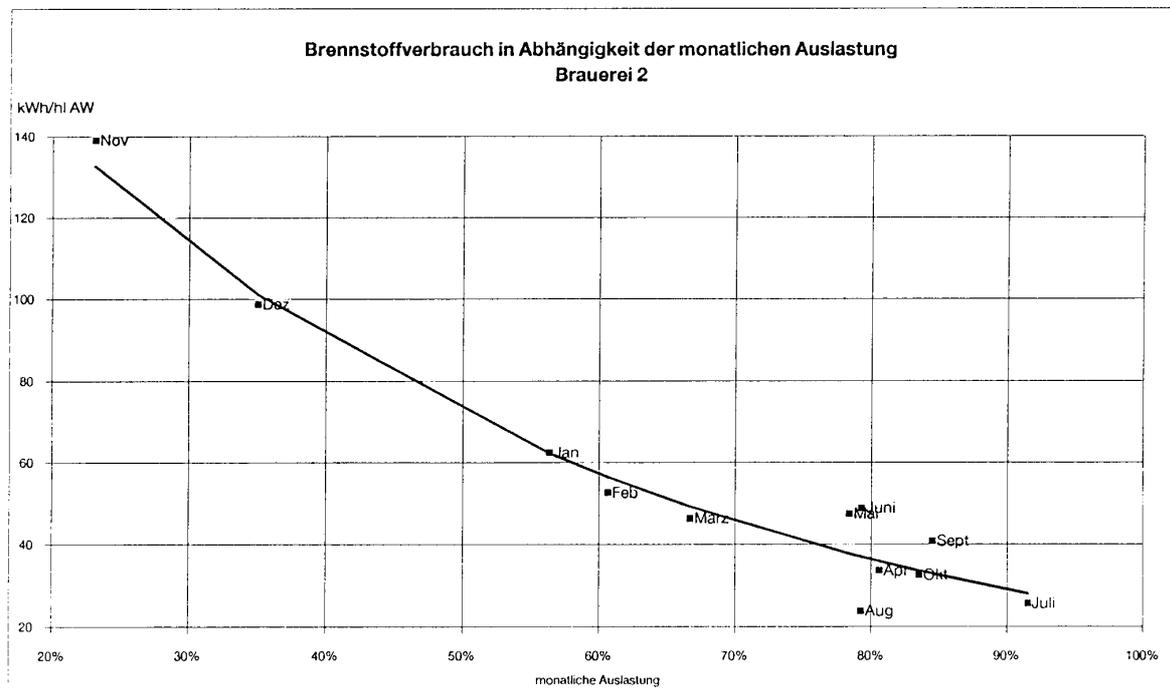
In der Brauerei 5 wirkt sich der Elektrizitätseinsatz zur Brauwassererwärmung und die direkte Befuerung der Sudpfannen günstig auf den spezifischen Brennstoffverbrauch aus.



Figur 4: Spezifischer Brennstoffverbrauch in Abhängigkeit von der produzierten Ausschlagwürze.

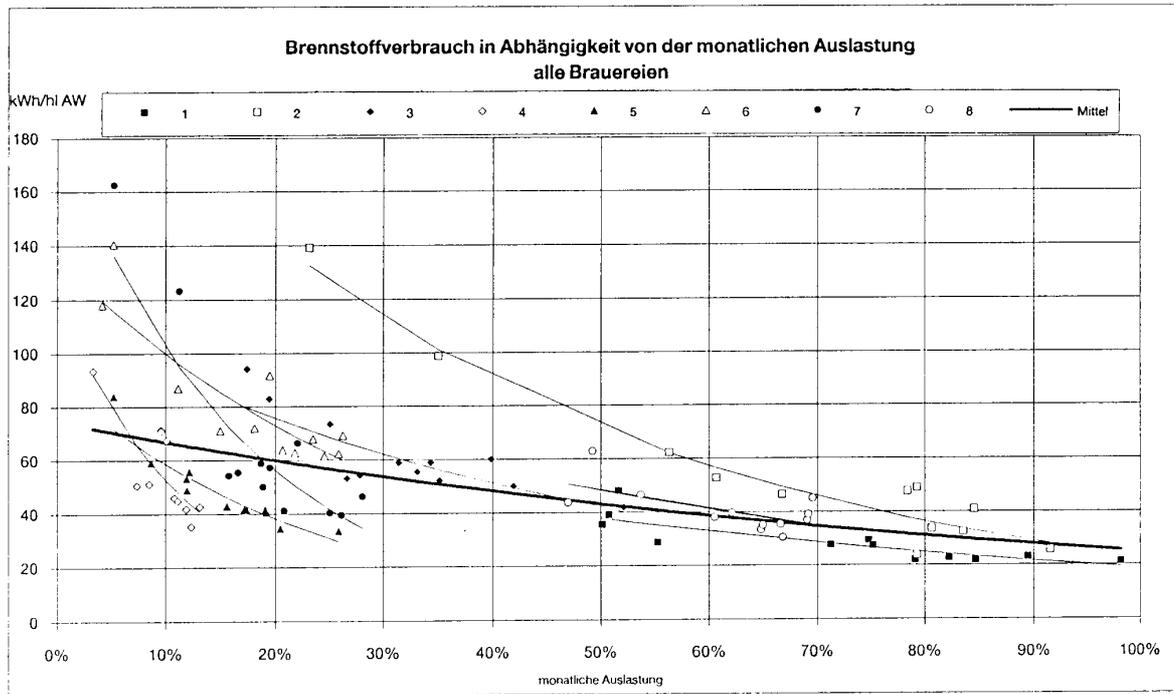
Figur 5: Diese Grafik zeigt den spezifischen Brennstoffverbrauch pro hl Ausschlagwürze einer Brauerei in Abhängigkeit von der monatlichen Auslastung des Sudhauses. Es ist eindrücklich, wie in den Monaten mit einer ungünstigen Auslastung die spezifischen Verbrauchswerte ansteigen.

Diese Tendenz wurde bei allen Brauereien, unabhängig von ihrer Grösse festgestellt. Eine Übersicht zeigt Figur 6.



Figur 5: Brennstoffverbrauch in Abhängigkeit von der monatlichen Auslastung

Figur 6 macht deutlich, dass bei allen Brauereien bei guten Auslastungen tiefere Kennwerte resultieren. Die grösseren Brauereien haben gute Auslastungen und deshalb im allgemeinen tiefere spezifische Kennwerte. Die Analyse jeder einzelnen Brauerei (dünne Kurven) zeigt nämlich, dass die spezifischen Monatswerte bei schlechten Auslastungen erheblich ansteigen, also in erster Linie von der spezifischen Auslastung abhängen und erst in zweiter Linie von der Grösse der Brauerei. Bei höheren Auslastungen haben auch die kleinen Brauereien gute Kennwerte.

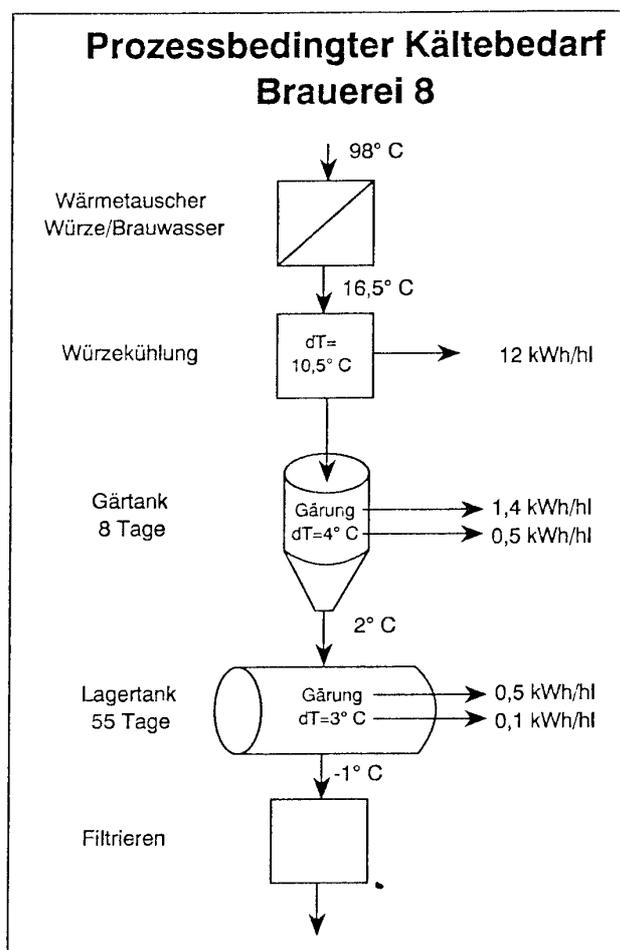


Figur 6: Brennstoffverbrauch in Abhängigkeit von der monatlichen Auslastung aller Brauereien

Kennzahlen im Bereich Lagerkeller

Die Kennwerte sollten der Beurteilung des Strom- und Kälteverbrauchs im Bereich Lagerkeller der Brauereien dienen. Die Brauereien sollten in die Lage versetzt werden, sich trotz unterschiedlicher Produktionsverfahren und Rahmenbedingungen vergleichen zu können um dadurch Schwachstellen und Verbesserungsmöglichkeiten herauszufinden.

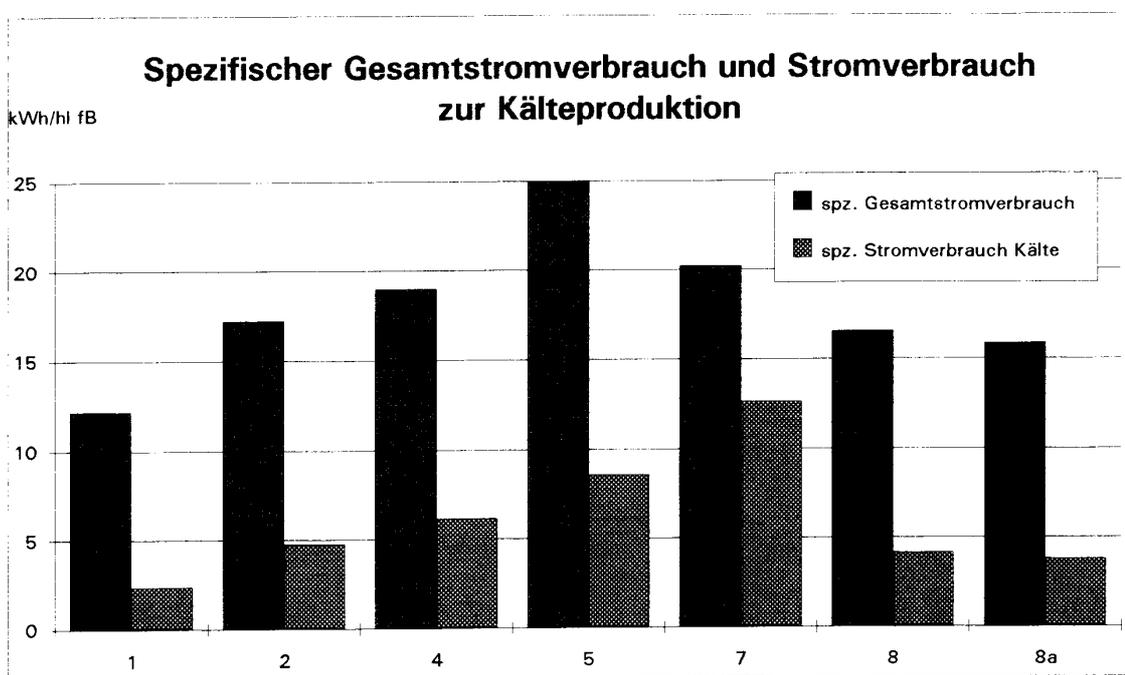
Die Abgrenzung des Bereichs Lagerkeller ist auf Figur 7 dargestellt. Bei der Analyse wurde der technisch notwendige Kältebedarf zur Abführung der Gärwärme und für Abkühlung des Biers berechnet und von dem tatsächlich benötigten Kälteverbrauch abgezogen. Die so erhaltenen Kälteverluste dienen der Beurteilung der einzelnen Prozessschritte im Bereich Lagerkeller. Die technisch notwendige Kälte einer untersuchten Brauerei ist ebenfalls auf Figur 7 eingetragen.



Figur 7: Prozessbedingter Kältebedarf im Lagerkeller

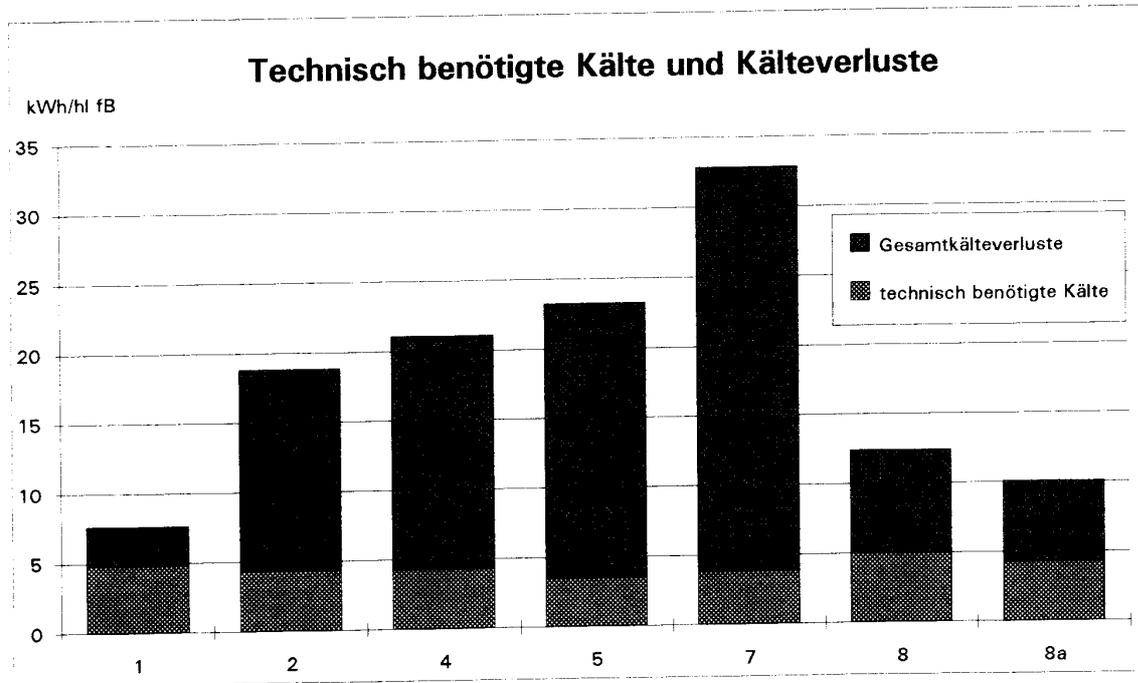
Als Bezugsgrösse dient die Menge filtriertes Bier, die den Output des Lagerkellers darstellt und in allen Brauereien gemessen wird. Alle Kennwerte wurden aus vorhandenen Betriebsstatistiken abgeleitet (Betriebsstundenzähler, Stromzähler, Produktionsstatistiken). Für die Brauerei 8 lagen die Kennzahlen für zwei Braujahre vor. Daher ist sie auf den folgenden Figuren doppelt aufgeführt.

Figur 8: Der Gesamtstromverbrauch der Brauereien schwankt zwischen 12 und 25 Kwh/hl filtriertes Bier. Der Stromverbrauch zur Kälteerzeugung bewegt sich zwischen 2,3 und 12,6 Kwh/hl filtrierten Biers. Die Brauerei 1 benötigt 19 % ihres Stroms zur Kälteerzeugung, die Brauerei 7 jedoch 62 % bzw. gut 5 mal so viel.



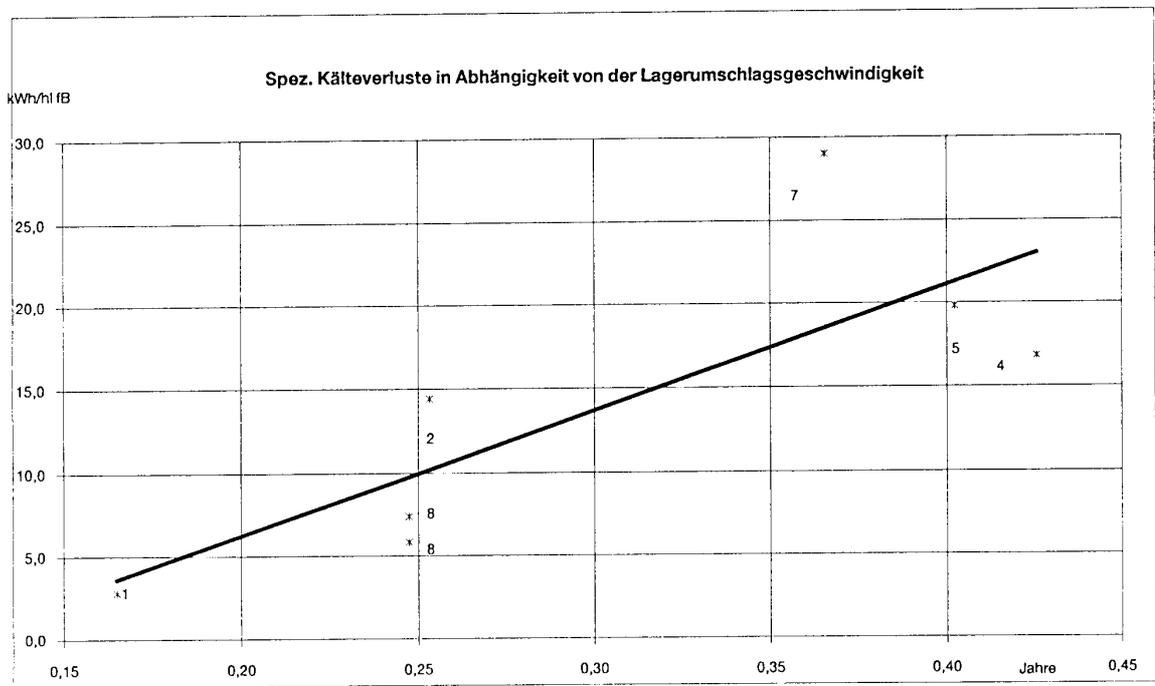
Figur 8: Spezifischer Gesamtstromverbrauch und spezifischer Stromverbrauch Kälte

Figur 9: Die Aufteilung in technisch benötigte Kälte und Verluste zeigt ein noch krasseres Verhältnis. Die technisch benötigte Kälte schwankt bei allen Brauereien zwischen 3,5 und 5 Kwh/hl filtriertes Bier, die Verluste jedoch zwischen 2,8 und 29 Kwh/hl filtriertes Bier. Bei der Brauerei 1 werden 37 % der produzierten Kälte zur Deckung der Verluste benötigt, bei der Brauerei 7 sind es 88 %.



Figur 9: Technisch benötigte Kälte und Gesamtkälteverluste

Figur 10: Eine Ursache der unterschiedlichen spezifischen Lagerverluste ist die Lagerumschlagsdauer. Diese schwankt zwischen 8 und 22 Wochen. Trägt man die Lagerverluste in Abhängigkeit von der durchschnittlichen Bierlagerungsdauer auf, so zeigt sich, dass ein Zusammenhang besteht. Dieser ist jedoch von weiteren Faktoren wie beispielsweise der Dammqualität der Lager und Kälteverteileranlagen überlagert.



Figur 10: Kälteverluste in Abhängigkeit von der Lagerumschlagsgeschwindigkeit

Die Diskussion in der Arbeitsgruppe, die durch die Kennwerte auf eine solide Basis gestellt wurde, löste bei den beteiligten Firmen bereits zahlreiche betriebliche Verbesserungen aus. Weitere technische und betriebliche Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz der Betriebe sind geplant und können nun anhand der Kennwerte energetisch beurteilt und bewertet werden.

Das wichtigste Ergebnis der Arbeiten in den Arbeitsgruppen ist jedoch, dass bei allen Arbeitsgruppenmitgliedern dem Energieverbrauch in Zukunft eine erhöhte Aufmerksamkeit zukommen wird in dem Bewusstsein, dass das Erfassen und Beobachten der Energieflüsse im Betrieb mit wenig Aufwand möglich ist und der daraus sich ergebende Nutzen den Aufwand bei weitem übersteigt.

1. EINLEITUNG

Das Impulsprogramm RAVEL (Rationale Verwendung von Elektrizität) des Bundesrates verfolgt das Hauptziel, die Zunahme des Stromkonsums zu brechen. Rationelle Verwendung von Elektrizität bedeutet, diese intelligent einzusetzen, gute Wirkungsgrade zu erzielen und überflüssige Energieverbräuche zu vermeiden. Die Förderung der rationellen Verwendung von Elektrizität ist sowohl aus umweltpolitischen, als auch aus ökonomischen Gründen geboten.

Das vorliegende Untersuchungsprojekt mit dem Titel "Kennwerte betrieblicher Prozessketten" entstand im Rahmen dieses Impulsprogramms und gehört dort in das Ressort "Industrie". Es wurde betreut von Herrn Prof. Dr. Spreng (ETHZ), Herrn Dr. Bertschinger (Bernische Kraftwerke AG), Herrn Dr. Huber (Von Roll AG) und Herrn Rosenmaier (ABB). Für die konstruktive Zusammenarbeit und die zahlreichen Anregungen sei an dieser Stelle gedankt.

Das Ziel der Untersuchung ist die Darstellung einer branchenunabhängigen Methode zur Ermittlung und Bewertung des Energieverbrauchs (Elektrizität, Wärme, Kälte etc.) von betrieblichen Prozessen und Prozessketten. Die ermittelten Kennzahlen sollen die Basis für Quervergleiche sein und den Erfahrungsaustausch zwischen einzelnen Unternehmen fördern, mit dem Ziel des sparsamen und rationellen Umgangs mit der Energie. Durch diesen Vergleich können energetische Schwachstellen der Betriebe identifiziert und Möglichkeiten aufgezeigt werden, wie Energie rationeller eingesetzt werden kann. Nach der Durchführung von Energiesparmassnahmen lassen sich diese dann mit Hilfe der Kennzahlen auf ihren Erfolg hin überprüfen.

Bei der Bildung der Kennzahlen steht nicht die Genauigkeit im Vordergrund, sondern die Praktikabilität der verwendeten Methode zu ihrer Gewinnung. Die einzelnen Betriebe müssen ihre eigenen Kennwerte mit geringem Aufwand selbst erheben, berechnen und interpretieren können. Die Kennzahlen sollen sich weitgehend aus den vorhandenen betrieblichen Statistiken ableiten lassen. Sind Statistiken nicht oder unvollständig vorhanden, sind die Verbrauchswerte durch einfache Messungen zu beschaffen. Bei der Aufteilung von Produktionsverfahren in einzelne Produktionsschritte sollen möglichst allgemeingültige Abgrenzungen definiert werden.

Die vorliegende Arbeit ist als Grundlage für die Ausarbeitung von Umsetzungsunterlagen (Schulungsunterlagen) gedacht. Die ausgeführten Beispiele sind daher bewusst sehr ausführlich dargestellt, um je nach Zielgruppe eine entsprechende Auswahl zu ermöglichen.

2. ZUSAMMENFASSUNG

Durch die Analyse des Energieverbrauchs zur Herstellung von Produkten lassen sich Möglichkeiten aufspüren, wie die Energie im Betrieb rationeller eingesetzt werden kann. Die Senkung des Energieverbrauchs führt zu Einsparungen von Kosten und zu einer Entlastung der Umwelt. Ein sehr griffiges Mittel bei der Energieanalyse ist die Bildung von Kennwerten, wobei der Energieverbrauch meist auf Produktionszahlen bezogen wird. Die so erhaltenen Zahlen lassen einen Vergleich mit Vorperioden, Zielwerten oder Vergleichswerte mit anderen Betrieben und anderen Produktionsverfahren zu.

Die vorliegende Arbeit beschreibt zunächst die grundsätzliche Methode, zur Bildung von Prozesskennwerten. Anschließend wird an den Beispielen Kunststoffspritzgiessen und Bierherstellung gezeigt, wie die Methode in der Praxis angewendet wird. In beiden Branchen wurden hierzu Arbeitsgruppen mit Vertretern mehrerer Firmen gebildet.

Die Bildung von Prozesskennwerten erfordert ein systematisches Vorgehen, bei dem als erstes das Ziel und der Zweck der Prozesskennwerte festgelegt werden muss. Danach wird der zu untersuchende Produktionsprozess von den nicht zu untersuchenden Betriebsteilen abgegrenzt und die zu analysierenden Energieflüsse bestimmt. Die Wahl der Bezugsgrößen ist entscheidend für die Aussagekraft der Kennzahlen und abhängig von der gewünschten Aussage. Erst nach diesen Vorüberlegungen kann falls nötig gemessen werden. Vor den Messungen muss aber die Methode zur Aufbereitung und Interpretation der Daten bereits festgelegt sein. Ebenso muss gewährleistet sein, dass die gewonnenen Erkenntnisse in betriebliches Handeln münden.

Beim Beispiel Kunststoffspritzgiessen dient die Methode der Bewertung des Energieverbrauchs von ganzen Produktionsmaschinen. Die Haupteinflussfaktoren werden analysiert und der Stromverbrauch dem Endprodukt, dem fertigen Kunststoffteil zugerechnet. Haupteinflussfaktor auf den Stromverbrauch ist die richtige Wahl der Maschine. Wird ein bestimmtes Teil auf einer zu grossen Maschine gefertigt, so sind die Energieverluste überproportional hoch.

Beim Beispiel Bierherstellung wird die Methode einerseits für einen Vergleich von verschiedenen Brauereien untereinander angewendet; andererseits wird für den Bereich Kälteerzeugung und -Verbrauch gezeigt, wie die Methode zur Analyse eines Teilprozesses eingesetzt werden kann.

Es zeigt sich, dass sich auch Brauereien mit einer sehr unterschiedlichen Grösse (1 : 100) gut vergleichen lassen.

Die Analyse der monatlichen Verbrauchswerte ergab, dass der Brennstoffverbrauch vor allem von der monatlichen Auslastung des Sudhauses und weniger von der Grösse der Brauerei abhängt. Bei guten Auslastungen sanken die Monatswerte bis auf 20 kWh/hl, in schlechten Monaten stiegen sie bis über 140 kWh/hl.

Der Stromverbrauch zum Antrieb der Kältekompressoren bei den einzelnen Brauereien hängt vor allem von der Grösse des Lagers in bezug zur verkauften Biermenge und der Qualität der Kälteerzeugung und -verteilung ab.

Aufgrund der durch die Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse wurde bei allen beteiligten Firmen ein verstärktes Energiebewusstsein geschaffen und zahlreiche Massnahmen zur rationellen Energieverwendung geplant und zum Teil bereits realisiert. Die während des Projektes gebildeten Arbeitsgruppen bestehen weiter.

3. DARSTELLUNG DER METHODIK

3.1 Überblick

Eingrundsätzliches Problem bei der Analyse von industriellen Fertigungsprozessen ist die Komplexität von Energiesystemen, die vor allem auf die folgenden Ursachen zurückzuführen ist:

- Energie tritt in den verschiedensten Erscheinungsformen auf und durchläuft den Prozess in sich ständig wandelnder Form.
- Die Energieflüsse beeinflussen sich gegenseitig, so dass immer das gesamte System betrachtet werden muss.
- Die Energieversorgung eines Betriebs ist oft über Jahrzehnte gewachsen. Das Verfolgen und die Analyse der einzelnen Energieflüsse wird hierdurch erheblich erschwert.
- Neben dem Verbrauch von Energie ist häufig auch die Leistung ein wichtiges Beurteilungskriterium. Diese beiden Größen müssen auseinandergelassen werden.

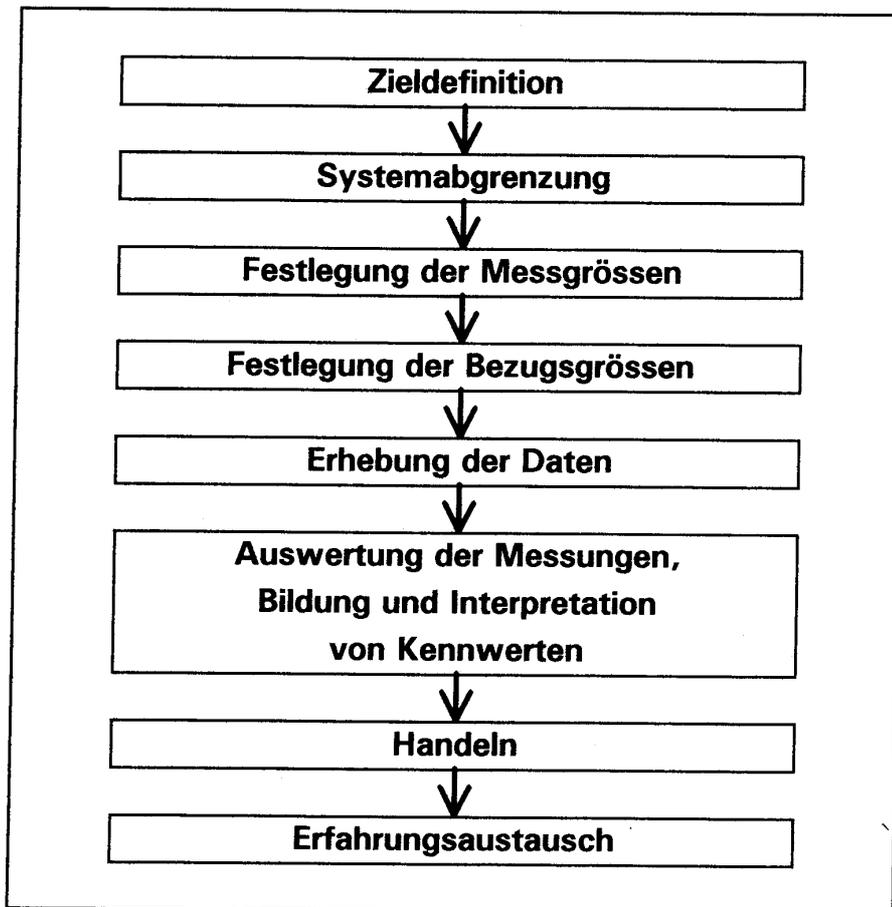
Die hier vorgestellte Methode zur Energieverbrauchsanalyse beschreibt ein Verfahren zur Bewertung einzelner Herstellungsprozesse oder deren Teile mittels geeigneter Kennzahlen. Sie geht dabei von den folgenden Grundsätzen aus:

- Die Analyse sollte so nah wie möglich am Prozess erfolgen. Das untersuchte System sollte möglichst eng eingekreist werden.
- Die Betrachtung sollte sich auf wenige Größen beschränken. Nur die wichtigsten Aussenbeziehungen und Energieflüsse werden untersucht.
- Die Vernachlässigung der übrigen Größen und Beziehungen muss bewusst erfolgen und bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden.
- Nach Möglichkeit sind zunächst alle bereits vorhandenen betrieblichen Daten auszuwerten.
- Messungen sind auf ein Minimum zu beschränken. Ebenso sollten die Anforderungen an die Messgenauigkeit möglichst gering sein.
- Vor jeder Messung muss das Verfahren der Auswertung und Interpretation bestimmt sein.

- Messen ist nur sinnvoll, wenn die gemessenen Werte auch betrieblich genutzt werden. Es muss bereits vor der Messung gewährleistet sein, dass aus den Ergebnissen der Kennzahlerhebung auch die entsprechenden Konsequenzen gezogen werden.

- Die Bildung von Kennzahlen und die Umsetzung der Resultate setzt die Bereitschaft zum Erfahrungsaustausch, zur Weiterbildung, zum Einsatz neuer Techniken und zum Setzen neuer Prioritäten voraus. Sie fordert flexibles Denken und Handeln aller Mitarbeiter einer Firma, insbesondere auch des Managements.

Aufgrund der komplexen Problemstellung und den oben dargelegten Grundsätzen empfiehlt sich bei der Energieanalyse



ein schrittweises Vorgehen nach dem folgenden Schema:

Figur 1: Methodisches Vorgehen zur Bildung von Kennwerten betrieblicher Prozesse

3.2 Zieldefinition

Die Voraussetzung für den Erfolg einer Prozessanalyse ist die Zieldefinition. Diese besagt, welches Ziel durch die Bildung von Kennzahlen verfolgt werden soll.

Der erste Schritt ist die Formulierung von konkreten Fragen. Der Nutzen, der durch die Beantwortung der Fragen erwartet wird, sollte grob abgeschätzt werden, um den möglichen Mess-, Auswerte- und Interpretationsaufwand ableiten zu können. Die Zielformulierung ist ferner Voraussetzung für die Systemabgrenzung, die Bestimmung der zu untersuchenden Energieströme und die an die Messeinrichtungen zu stellenden Genauigkeitsanforderungen.

Einige mögliche Ziele von Energieanalysen sind im folgenden aufgeführt.

3.2.1 Erkennen energetischer Schwachstellen

Bei diesem Ziel vermitteln die Kennzahlen in einem ersten Schritt einen allgemeinen Überblick; in einem zweiten Schritt können die gefundenen Schwachstellen näher analysiert werden. Eine Schwachstellenanalyse erfordert ein systematisches Vorgehen bei der Energieverbrauchserfassung und der Begutachtung der wichtigsten Energieverbraucher. Der Zweck einer Schwachstellenanalyse ist im allgemeinen:

- Bestimmung der mengenmässig bedeutenden Energieflüsse
- Ermitteln der Verlust-Energieflüsse
- Abschätzung des Sanierungspotentials
- Bestimmung der Möglichkeiten zur rationellen Energienutzung wie z.B. durch Wärmerückgewinnung, Mehrfachnutzungen etc.
- Bewertung der Versorgungssicherheit und Bestimmung der Möglichkeiten der Eigenstromerzeugung mit Wärme-Kraft-Kopplung.
- Setzen von Prioritäten für Sanierungsmassnahmen unter Berücksichtigung der einsparbaren Energiemengen und der lang- und mittelfristig geplanten Investitionen und Umbauten des Betriebs. Aufteilung in Sofortmassnahmen, mittel- und langfristige Massnahmen.

Ein Beispiel einer Schwachstellenanalyse befindet sich in Kapitel 5.5 Analyse des Kälteverbrauchs im Bereich Lagerkeller einer Brauerei Seite 69 ff.

3.2.2 Erkennen von Faktoren, die den Energieverbrauch beeinflussen

Hier ist das Ziel der Kennzahlen, zu erkennen, durch welche Faktoren der Energieverbrauch eines Systems bestimmt wird. Oft können bei einem Fertigungsprozess zahlreiche Parameter wie z.B. Temperaturen, Verweilzeiten, Werkstoffe, Drehzahlen, Geschwindigkeiten, Drücke o.ä. in gewissen Grenzen variiert werden. Der Einfluss dieser Faktoren auf den Energieverbrauch ist jedoch in der Regel nicht genau bekannt, so dass dieser bei der Einstellung der Prozessparameter nicht genügend berücksichtigt wird. Eine genauere Kenntnis der Zusammenhänge und deren Berücksichtigung bei der Prozessführung kann zu spürbaren Energieeinsparungen führen. Die genaue Analyse solcher Zusammenhänge erfordert ein systematisches Vorgehen mit zahlreichen Messungen und einen relativ grossen Interpretationsaufwand. Gegebenenfalls ist es vorteilhaft, sich zur Klärung grundsätzlicher Fragen mit anderen Firmen und/oder dem Maschinenhersteller zusammenzuschliessen. Eventuell ist eine zentrale Einrichtung (z.B. ein Forschungsinstitut) mit der Durchführung von Versuchen zu beauftragen.

Beispiel: Untersuchung beim Kunststoffspritzgiessen, Kapitel 4.4 bis 4.8, Seite 23-48.

3.2.3 Bewertung von Anlagen/Anlageteilen/Maschinen bei der Neuanschaffung oder Sanierung

Bei den Fragen, ob und wie eine Anlage saniert werden soll, welches Verfahren zur Produktion eines bestimmten Gutes sich am besten eignet, ob die Maschine A oder B beschafft wird etc., werden häufig nur die Investitionskosten miteinander verglichen, die unterschiedlichen Betriebskosten jedoch vernachlässigt. Häufig fehlen auch die nötigen Informationen, um den unter den spezifischen betrieblichen Bedingungen zu erwartenden Energieverbrauch vorherzusagen.

Das Ziel einer Energieanalyse wäre in diesem Fall eine Kennzahl zu ermitteln, die es ermöglicht, die verschiedenen Investitionsvarianten hinsichtlich ihres Energieverbrauchs und ihrer Energiekosten (Betriebskosten) zu vergleichen.

Der absolute Energieverbrauch (z.B. in kWh pro Jahr) ist als Vergleichsgrösse nur geeignet, wenn die Alternativen hinsichtlich Kapazität, erwartetem Output und Einsatzprofil gleich sind. Andernfalls müssen spezifische Kennwerte gebildet werden (z.B. kWh/Stück oder kWh/Tonne). Kennwerte haben ausserdem den Vorteil, dass sich verschiedene Betriebe vergleichen lassen. Bei Anlagen, deren Auslastung mit der Zeit schwankt, empfiehlt es sich, den Kennwert in Abhängigkeit der Auslastung zu ermitteln.

Beispiel Bierbrauereien Kapitel 5.4, Seite 54
 Beispiel Kunststoffspritzgiessen Kapitel 4.8, Seite 46

3.2.4 Optimale Belegung von Anlagen oder Maschinen

Verfügt ein Betrieb über eine Anlage oder einen Maschinenpark, der nicht vollständig ausgelastet ist, so stellt sich die Frage, wie diese Anlagen bzw. einzelne Maschinen auch unter energetischen Gesichtspunkten optimal eingesetzt werden können. Im einzelnen können sich beispielsweise die folgenden Probleme stellen:

- Ein Teil kann auf verschiedenen Maschinen hergestellt werden. Welche Maschine ist energetisch am günstigsten?
- Ist es günstiger eine Maschine 24 Stunden zu betreiben oder drei Maschinen während 8 Stunden?
- Ist es günstiger, eine Anlage über eine gewisse Zeit voll auszulasten und dann abzuschalten oder ist es besser diese über eine längere Zeit auf Teillast zu betreiben?

Beispiel Bierbrauereien

Seite 68

Beispiel Kunststoffspritzgiessen

Seite 46

3.2.5 Optimale Betriebsorganisation

Durch eine Verringerung der Leerlauf-, Stillstands- und Warmlaufzeiten von Maschinen, Anlagen oder deren Teile, aber auch durch andere Verbesserungen der Betriebsorganisation können unter Umständen Energieverluste vermieden werden. Die Aufgabe der Energieanalyse ist hierbei, diese Potentiale herauszuarbeiten, die dann wiederum die Basis für Kosten/Nutzenüberlegungen von betrieblichen Massnahmen sind. Folgende Fragestellungen sind denkbar:

- Soll eine Maschine abgeschaltet werden oder besser im Leerlauf auf ihren nächsten Einsatz warten?
 - Wann muss eine Anlage spätestens eingeschaltet werden, um zur gewünschten Zeit betriebsbereit zu sein?
 - Ist es sinnvoll einzelne Anlagenteile erst zu einem späteren Zeitpunkt einzuschalten?
 - Wie hoch sind die Stillstandsverluste, gibt es Möglichkeiten diese zu verringern (z.B. temporäre Isolation)?
 - Ist es sinnvoll eine Anlage über das Wochenende abzuschalten?
- Beispiel Kunststoffspritzgiessen, Seite 35-37

3.2.6 Betriebsüberwachung/Motivation der Mitarbeiter

Ein Teil des Energieverbrauchs im Betrieb ist durch das Verhalten seiner Mitarbeiter beeinflussbar. Sei es durch die korrekte Einstellung von Prozessparametern an Maschinen oder Anlagen, durch Vermeiden von Unachtsamkeiten oder Nachlässigkeiten, durch Aufspüren von Defekten o.ä.. Oft liesse sich ein Teil des Energieverbrauchs durch sichtbar machen dieser Verluste sowie entsprechende Motivation und Information der Mitarbeiter vermeiden. Es ist daher sinnvoll, den Energieverbrauch periodisch (täglich, wöchentlich oder monatlich) zu erfassen und an die "Verursacher" zurückzumelden. Hierbei sind folgende Punkte zu beachten:

- Es sollten Störgrößen wie z.B. unterschiedliche Produktionsauslastungen, Wechsel der Produktpalette o.ä. herausgefiltert werden. Hierzu eignen sich Kennzahlen.
- Es sollten möglichst nur diejenigen Energieströme präsentiert werden, die von den jeweiligen Adressaten beeinflusst werden können.
- Auf die Aussagekraft und die Verständlichkeit der Darstellung ist besonderer Wert zu legen.

3.2.7 Verursachergerechte Energiekostenverteilung

Die Aufteilung der Energiekosten nach Kostenstellen und Kostenträgern wird bei den Energiekosten oft nicht angewendet, weil die entsprechenden Informationen fehlen. Eine verursachergerechte, dem tatsächlichen Verbrauch entsprechende Kostenverteilung ist jedoch aus folgenden Gründen wünschenswert:

- An Kostenstellen, bei denen ein hoher Energieverbrauch auftritt, wird ein entsprechendes Kostenbewusstsein geschaffen.
- Durch eine verursachergerechte Zuteilung der Energiekosten auf die Kostenträger und somit auf die Endprodukte werden diese Kosten an den Markt weitergegeben, was zu gewünschten volkswirtschaftlichen Effekten führt.
- Werden die Energieverbräuche bereits bei der Kalkulation berücksichtigt, können weniger energieintensive Produkte bevorzugt werden.

Beispiel Kunststoffspritzgiessen, Seite: 41

Hier müsste der spezifische Energieverbrauch pro Teil noch mit dem Strompreis multipliziert werden.

3.2.8 Vergleich mit anderen Betrieben

Für Betriebe, die ähnliche Produkte herstellen oder ähnliche Verfahren anwenden, ist es vorteilhaft, wenn sie ihr Wissen über den Energieverbrauch der einzelnen Verfahren und die Energieeinsparmöglichkeiten sowie ihre Erfahrungen mit neuen Techniken austauschen. Dieser gegenseitige Erfahrungsaustausch erhöht die Innovationskraft und stärkt die Marktstellung der daran beteiligten Firmen. Voraussetzung für einen Vergleich ist die Bildung von Kennwerten nach einem einheitlichen Verfahren und das Offenlegen der Rahmenbedingungen, unter denen die Messwerte gewonnen wurden. Mit Hilfe solcher Kennwerte lassen sich Prozesse oder einzelne Prozessschritte miteinander vergleichen.

Beispiel Bierherstellung, Seite 54-69 und Seite 79-85

3.3 Systemabgrenzung

Um eine genau definierte Aussage über die Energieflüsse zu erhalten, ist eine Systemabgrenzung nötig. Es soll nur untersucht werden, was der Beantwortung der gestellten Fragen (Zieldefinition) dient. Je näher man die Energieströme beim Verbraucher misst, desto weniger Störgrößen beeinflussen die Messungen und desto leichter lassen sich die Ergebnisse interpretieren. Vereinfachungen und Vernachlässigungen müssen vorgenommen werden, sollen aber bewusst erfolgen.

Die wichtigsten Fragen, die bei der Systemabgrenzung beantwortet werden müssen, sind:

3.3.1 Welche Teile des Betriebes sollen einbezogen werden?

Soll beispielsweise für den Betrieb als Ganzes eine Schwachstellenanalyse mittels Kennzahlen durchgeführt werden, soll nur der eigentliche Produktionsprozess oder gar nur Teile davon untersucht werden? Je nach Frage müssen die gesamten Energieflüsse grob betrachtet oder nur die durch einen Prozess durchgesetzte Energie untersucht werden. Soll ein Produkt energetisch bewertet werden, muss gegebenenfalls auch der Energieverbrauch zur Herstellung seiner Rohstoffe und zu seiner Entsorgung berücksichtigt werden.

Bei der Eingrenzung und Aufteilung des zu untersuchenden Systems ist es vorteilhaft, die betrieblichen Abgrenzungen und Aufteilungen wie Gebäudegrenzen, Abteilungen, Buchhaltung, Kalkulation, AVOR o.ä. einzubeziehen.

3.3.2 Kann/soll der betrachtete Prozess in Teile zerlegt werden?

Die Unterteilung eines Herstellungsprozesses in Teilprozesse und die Bildung von Kennzahlen für die einzelnen Prozessschritte bringt einerseits erheblich konkretere Aussagen. Andererseits steigt der Aufwand zur Erfassung und Beurteilung der einzelnen Energieflüsse stark an. Ausserdem ist die Aufteilung eines Prozesses in Teilprozesse nur dann möglich, wenn die Teilprozesse räumlich getrennt ablaufen. Eventuell ist ein 2-stufiges Vorgehen angebracht, bei dem zunächst dem Gesamtprozess eine Kennzahl zugeordnet wird. In einem zweiten Schritt wird dann zusätzlich der energetisch relevante Teilprozess untersucht.

3.3.3 Welche Energien sollen betrachtet werden?

Die bezogene Energie lässt sich z.B. aus Rechnungen der Lieferanten und aus dem Energieinhalt der Energieträger leicht berechnen. Die Energieträger werden jedoch nur zum Teil direkt gebraucht, zum Teil erst nach ihrer Umwandlung in Zwischenformen wie Dampf, Kälte, Druckluft o.ä. Grundsätzlich sollte die Energie in der Form gemessen werden, in welcher sie vom Prozess benötigt wird. Andernfalls werden Verluste, z.B. bei der Energieumwandlung und Verteilung, am falschen Ort erfasst. Benötigt beispielsweise ein Prozess Dampf, so sollte nach Möglichkeit die in den Prozess eingespeisene Dampfmenge und nicht der Brennstoffverbrauch zur Dampferzeugung gemessen werden.

Ferner sollte sich die Bildung von Kennzahlen auf die wichtigsten Energien konzentrieren. Werden für einen Prozess mehrere Energien benötigt, wie beispielsweise Strom, Druckluft und Kälte, so ist häufig eine Energieform dominant oder der Verbrauch einer Energieform bestimmt den Verbrauch einer anderen (z.B. der Kältebedarf wird durch den Wärmefall der Stromverbraucher bestimmt) und kann grob abgeschätzt werden. Die benötigte Leistung und die verbrauchte Energie sind auseinander zu halten. Letztere steht im Zentrum einer Energieanalyse; die Analyse der Leistung ist meist eine Ergänzung.

3.3.4 Welcher Betriebszustand soll untersucht werden?

Je nach Fragestellung ist die Anlage/Maschine im Beharrungszustand (warmgelaufenen und unter konstanten Produktionsbedingungen), im Teillastbetrieb, im Leerlauf, beim Warmlaufen oder unter besonderen Betriebsbedingungen zu analysieren. Eventuell ist nach Einsatz und Ruhezeit der Maschine zu unterscheiden. Die Einsatzzeit wiederum lässt sich in Nutz- und Brachzeit, die Nutzzeit in Haupt- und Nebenzeit einteilen (siehe auch Spreng 1986, Seite 53). Gegebenenfalls müssen "Normbedingungen" definiert werden, unter denen die Kennzahlen bestimmt werden sollen. Diese können branchen-, betriebs-, fallspezifisch etc. sein.

3.3.5 Häufigkeit der Messungen

Zur Bestimmung von Maschinen- und Anlagekenngrößen genügt meist eine einmalige Messung, die gegebenenfalls gelegentlich zu wiederholen ist. Soll der Energieverbrauch pro Produkt bestimmt werden, so muss für jedes Produkt der spezifische Verbrauch einmal bestimmt werden. Kann das Produkt wahlweise auf verschiedenen Maschinen gefertigt werden, muss für jede Maschine der Verbrauch erhoben werden.

Soll die Verbrauchserfassung zur Überwachung und Motivation dienen, so müssen die entsprechenden Messungen und Kennwertbildung regelmässig (jährlich, monatlich, wöchentlich, täglich oder kontinuierlich) durchgeführt werden. Die Messwertablesungen sollten immer zum selben Zeitpunkt erfolgen z.B. am Ende jedes Monats, jeden Freitagabend o.ä.).

Beispiel Systemabgrenzung: Kunststoffspritzgiessen, Seite 23, 24
Bierherstellung, Kapitel 5.4, Seite 54 und Kapitel 5.5, Seite 69

3.4 Festlegung der Messgrößen

Es gilt der Grundsatz: So wenig wie möglich messen. Oft lassen sich die gesuchten Größen aus bekannten Größen ableiten. Manchmal ist es möglich mit wenig Messungen sowie etwas Überlegung und Rechenarbeit die gewünschte Information zu bekommen.

Die möglichen Messstellen werden durch betriebliche Gegebenheiten bestimmt. Daher ist die genaue Kenntnis der Energieumwandlungs- und Verteilanlagen erforderlich. Gegebenenfalls müssen zunächst geeignete Pläne und Übersichten erstellt werden.

Die Wahl der Messstellen erfolgt nach folgenden Kriterien:

- Der Messpunkt sollte so nah wie möglich beim Verbraucher liegen.
- Der Aufwand für die Installation der Messgeräte sollte möglichst klein sein.
- Wenn eine periodische Ablesung vorgesehen ist, sollte die Messwertaufnahme und Weiterleitung automatisiert werden können.

Bei jeder geplanten Messung ist zu überlegen, ob der Messaufwand im Verhältnis zum Nutzen gerechtfertigt ist, den man von der Messung erwartet. Unter Umständen muss auf die Messung verzichtet oder der fragliche Energiestrom über einen Umweg bestimmt werden. Soll beispielsweise der Druckluftverbrauch bestimmt werden, lässt sich dieser aus dem Elektrizitätsverbrauch des Kompressors oder aus dessen Laufzeiten ableiten; hierbei müssen jedoch Annahmen über den Wirkungsgrad zur Druckluftherzeugung getroffen werden. Der Messaufwand zur Erfassung der verschiedenen Energieflüsse ist sehr unterschiedlich und hängt zudem von der geforderten Genauigkeit ab. Die Genauigkeit der Messeinrichtung sollte nicht unnötig hoch sein, aber in jedem Fall so gewählt werden, dass die Verbrauchsschwankungen, die erkannt werden sollen, mit genügender Sicherheit abgebildet werden.

Bei der Wahl der Messgeräte ist es von Vorteil, wenn sie die Messwerte automatisch speichern können, so dass sie mit dem PC weiterverarbeitet werden können (vor allem bei kurzen Messintervallen entstehen grosse Datenmengen).

Die Länge der Messintervalle sollte so gewählt werden, dass statistische Schwankungen ausgeglichen, Schwankungen im Prozess jedoch erfasst werden. Der Zeitpunkt der Ablesungen muss bei Einzelmessungen an den Prozess angepasst werden und bei periodischen Messungen immer nach dem selben Schema erfolgen.

Beispiel Kunststoffspitzgiessen, Kapitel 4.5, Seite 25
Bierherstellung, Seite 55 und Seite 69 unten

3.5 Festlegen der Bezugsgrössen

Kennwerte werden gebildet, indem die Messgrösse (z.B. Energieverbrauch einer Periode) durch eine Bezugsgrösse (z.B. Anzahl gefertigte Teile während dieser Periode) dividiert wird. Die richtige Wahl der Bezugsgrösse ist dafür entscheidend, ob die in der Zieldefinition gestellten Fragen beantwortet werden können.

Die Bezugsgrösse sollte mit dem Energieverbrauch möglichst linear korrelieren, so dass auf einfache Art ein Quotient aus Verbrauch und Bezugsgrösse gebildet werden kann. Andernfalls muss der funktionelle Zusammenhang bekannt sein oder ermittelt werden.

Ferner muss sich die Bezugsgrösse ohne grossen Aufwand in der geforderten zeitlichen Auflösung ermitteln lassen. Nach Möglichkeit sollten daher Grössen gewählt werden, die ohnehin durch die betriebliche Statistik erfasst werden.

Beispiel Kunststoffspritzgiessen, Kapitel 4.6, Seite 26
Bierherstellung, Seite 54/55 und Seite 69

3.6 Erhebung der Daten

Bereits vor der Erhebung der Daten muss die Methode zu deren Aufbereitung und Interpretation feststehen.

Sind Messungen notwendig, müssen alle prozessbestimmenden Parameter und die zur Messzeit herrschenden Randbedingungen möglichst genau festgehalten werden, so dass später die Messung richtig interpretiert werden kann. Dazu sollten vor jeder Messung Protokolle o.ä. vorbereitet werden, in die diese Angaben eingetragen werden.

Diese Protokolle sollten die im Betrieb üblichen Begriffe enthalten, alle Größen sollten in den Einheiten einzutragen sein, wie sie vor Ort gemessen werden. Alle Formulare sind vor den Messungen darauf zu testen, ob sie unter den Betriebsbedingungen von den entsprechenden Personen verstanden werden und ausgefüllt werden können.

Nach jeder Datenerhebung und dem Auswerten jeder Messung muss eine Fehlerabschätzung durchgeführt werden.

Beispiel Kunststoffspritzgiessen, Seite 27 - 30

Bierherstellung, Seite 55 und Seite 79

3.7 Auswertung der Messungen, Bildung und Interpretation von Kennwerten

Die Messwerte müssen nun so aufbereitet werden, dass sie hinsichtlich der gestellten Fragen interpretiert werden können. Vor der Bildung von Kennwerten sind die Messwerte kritisch zu betrachten.

In der Regel wird der Energieverbrauch eines Prozesses von mehreren Faktoren bestimmt, so dass aus Messungen bei unterschiedlichen Bedingungen auch unterschiedliche Kennzahlen resultieren.

Um eine Kennzahl interpretieren zu können, müssen daher die Bedingungen, unter denen eine Kennzahl ermittelt wurde, genau bekannt sein.

3.7.1 Parameterdarstellung

Um einen Vergleich zu ermöglichen, ist gegebenenfalls die Rückführung auf normierte Bedingungen erforderlich. Hierzu muss allerdings der Einfluss verschiedener Bestimmungsfaktoren auf den spezifischen Energieverbrauch bekannt sein.

Um den Einfluss eines Faktors auf den spezifischen Energieverbrauch zu bestimmen, wird bei sonst unveränderten Bedingungen nur dieser Parameter variiert und dabei der Energieverbrauch bestimmt. Die so erhaltenen Kennwerte können dann grafisch oder statistisch ausgewertet werden.

Welchen Einfluss ein bestimmter Parameter auf den Energieverbrauch hat, lässt sich nicht immer genau beantworten. Oft liegen nicht genügend Messpunkte vor oder die Streuung der Messpunkte ist zu gross, als dass eine gesicherte Aussage abgeleitet werden könnte. Die graphische Darstellung veranschaulicht jedoch häufig die qualitative Abhängigkeit, so dass zumindest grobe Zusammenhänge erkannt werden können. (Auf statistische Methoden zur Auswertung von streuenden Messgrössen wird hier nicht näher eingegangen werden).

Ist der Zusammenhang von spezifischer Verbrauchszahl und eines sie beeinflussenden Parameters bekannt, kann die Kennzahl auf einen Standard-Wert korrigiert werden (Beispiel: Korrektur des spezifischen Heizenergieverbrauchs eines bestimmten Jahres mit Hilfe der Heizgradtage auf ein Durchschnittsjahr). Durch eine solche Normierung von Kennzahlen kann die Wirkung von bekannten Einflussfaktoren eliminiert werden, womit die Kennzahlen an Aussagekraft gewinnen.

Beispiel Kunststoffspritzgiessen, Seite 34 unten
Bierherstellung, Seite 68

3.7.2 Zeitreihen

Auch die Bildung von Zeitreihen ist eine Methode, die sich zum Beobachten bestimmter Kenngrössen und deren Veränderungen im Verlauf der Zeit eignet. Tendenzen und sonstige Veränderungen lassen sich leicht erkennen. Die Kennzahlen (auch korrigiert) können auch mit Sollwerten verglichen werden. Bei der Bildung der Werte ist darauf zu achten, dass diese immer nach dem selben Verfahren erhoben und ausgewertet werden und dass die Messintervalle gleich lang sind.

Ein besonderes Merkmal von Zeitreihendarstellungen ist die leichte Verständlichkeit. Zeitreihenauswertungen sind periodisch zu aktualisieren, deshalb empfiehlt es sich, diese PC-gestützt zu erstellen. Für die wichtigsten betrieblichen Verbrauchswerte sollte die aktuelle Zeitreihenauswertung für alle Mitarbeiter immer sichtbar ausgehängt sein.

Beispiel Bierherstellung, Seite 58

3.7.3 Energieflussbild

Das Energieflussbild veranschaulicht den Weg, den der Gesamt-Energiefluss innerhalb eines Betriebes, einer Anlage oder eines Anlagenteils geht und zeigt dessen Verteilung auf die einzelnen Verbraucher aber auch Verlustquellen etc. auf. Es basiert auf dem Gesetz der Energieerhaltung: Energie kann nur umgeformt, jedoch nicht verbraucht werden. Alle Energieformen werden auf ihrem Weg vom

Eintritt bis zum Verlassen des Systems verfolgt. Für jede Umwandlungsstufe gilt: Energie-Input = Energie-Output. Alle Kennzahlen werden in der gleichen Einheit angegeben und auf die gleiche Grösse bezogen, z.B. kWh/Stück etc. Die Betrachtung des Energieflussbildes erlaubt einen raschen Überblick über die wichtigsten Energieflüsse und Energiewandler, über Schwachstellen und Möglichkeiten von Verbesserungen. Durch die Betrachtung aller Energien wird gewährleistet, dass keine wichtigen Elemente übersehen werden.

Da in einem Energieflussbild nur die Energieflüsse während einer bestimmten Periode dargestellt sind, muss bei der Interpretation auf die folgenden Punkte geachtet werden:

- Schwankungen der Leistung der einzelnen Verbraucher können nicht dargestellt werden. Unter Umständen treten einzelne Energieflüsse zeitlich versetzt auf. Beispiel: Abwärmearbeit einer Kälteanlage und Wärmenachfrage zur Raumbeheizung. Hier könnte ein getrenntes Energieflussbild für Sommer und Winter sinnvoll sein.
- Die energetische Wertigkeit der Energieflüsse wird nicht dargestellt. So kann beispielsweise das Temperaturniveau eines Abwärmestroms so tief liegen, dass die Energie nicht weiterverwendet werden kann.

Beispiel Bierherstellung, Seite 78

3.8 Handeln

Den innerbetrieblichen Abschluss einer Energieanalyse bildet die Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse. Die identifizierten Möglichkeiten, wie Energie im Prozess rationeller eingesetzt werden kann, muss in entsprechendes konkretes Handeln münden. Hierzu sind die notwendigen Kompetenzen und Verantwortlichkeiten zu schaffen. Ebenso müssen effiziente Kontrollinstrumente bereitgestellt werden, damit der Erfolg der Massnahmen im Nachhinein kontrolliert werden kann.

Je nach Betriebsgrösse, organisatorischer Differenzierung des Betriebes und Energieintensität der Produktion ist ein entsprechendes betriebliches Energiemanagement auszugestalten. Dessen organisatorische Ausprägung hängt nicht zuletzt auch davon ab, ob einmalige Projekte durchgeführt werden oder ob es um den rationellen Einsatz von Energie als Daueraufgabe geht. Da das Thema Energie alle Bereiche des Betriebes tangiert und in der Regel ein gesamtheitliches Denken und Handeln erfordert, sollte das Energiemanagement nicht an eine Abteilung gebunden sein, sondern direkt der Unternehmensleitung unterstellt werden.

Beispiel Kunststoffspritzgiessen, Seite 48

Bierherstellung, Seite 86 - 89

3.9 Erfahrungsaustausch

stausch von Unternehmen der gleichen Branche können die

Durch den Erfahrungsaustausch beim rationellen Einsatz von Energie gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen beschleunigt verbreitet werden. Dadurch wird die Effizienz der an dem Erfahrungsaustausch beteiligten Firmen gesteigert. Kennzahlen können als Basis dienen, um in der Diskussion die unterschiedlichen Verfahrensweisen im Umgang mit der Energie in den einzelnen Unternehmen zu beschleunigen. Voraussetzung für einen Vergleich ist, dass die beteiligten Firmen ihre Kennzahlen auf die gleiche Art und Weise ermitteln, das heisst, dieselben Systemabgrenzungen, Mess- und Bezugs-

größen wählen.

Für das Zustandekommen einer Erfahrungsgruppe aus verschiedenen Unternehmen einer Branche ist es vorteilhaft, wenn

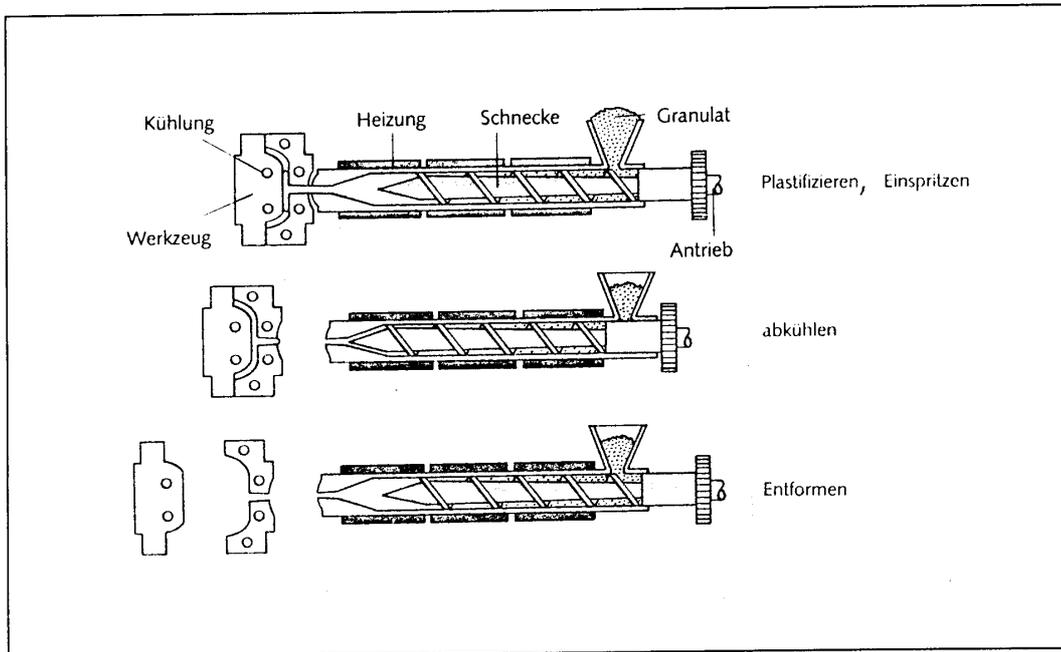
- der Erfahrungsaustausch von einer neutralen Stelle aus initiiert wird, wie z.B. dem Branchenverband
- die Erfahrungsgruppe - zumindest bei den ersten Sitzungen - durch einen unabhängigen Externen fachlich unterstützt wird
- die Teilnehmer der Arbeitsgruppe aus der technischen Leitung des Betriebs delegiert sind.

Beispiel Bierherstellung, Seite 86 - 89

Kunststoffspritzgiessen, Seite 48

4. DAS BEISPIEL KUNSTSTOFFSPRITZGIESSEN

In der Schweiz gibt es zur Zeit ca. 300 Firmen, bei denen dieses Fertigungsverfahren zur Herstellung von Kunststoffteilen angewendet wird. Das Kunststoffspritzgießen ist relativ energieintensiv, die Elektrizitätskosten liegen bei ca. 2 - 5 % der Fertigungskosten.



Figur 2: Die Prozessschritte beim Kunststoffspritzgießen

4.1 Beschreibung des Herstellverfahrens/Stand des Wissens

Das Kunststoffspritzgießen ist ein weit verbreitetes Verarbeitungsverfahren zur Herstellung von Formteilen aus Kunststoff. Das Spektrum der hergestellten Teile reicht von Kleinteilen von weniger als 1 g über weit verbreitete Gebrauchsgenstände (z.B. alle Kunststoffteile eines Telefons) bis zu Teilen von mehreren kg Gewicht (z.B. Kunststoffkisten, Stossstangen u.v.m.).

Das Verfahren erfolgt immer nach dem folgenden Schema (siehe auch Figur 2):

- Das Ausgangsmaterial ist Kunststoffgranulat, welches zum Teil vor der Verarbeitung noch getrocknet werden muss. Es kommen die unterschiedlichsten Kunststoffe (i.d.R. Thermoplaste) zum Einsatz.

- Über eine Schnecke wird das Granulat in den Spritzgusszylinder gefördert. Dieser ist beheizt, so dass das Material aufschmilzt, vermischt und verdichtet wird.
- Das aufgeschmolzene Material wird durch ein Vorschieben der Schnecke durch die Düse, die sich am Ende des Zylinders befindet, in die Form gepresst.
- Nachdem das Material in der (meist gekühlten) Form erstarrt ist, wird diese geöffnet und das fertige Teil kann ausgestossen werden.
- Der Fertigungszyklus kann von Neuem beginnen.

Obwohl das Kunststoffspritzgiessen ein energieintensiver Prozess ist, ist über die Höhe des Energieverbrauchs, seine Bestimmungsfaktoren und die Möglichkeiten seiner Beeinflussung nur wenig bekannt. Die wenigen Arbeiten, die zu diesem Thema existieren, sind privat finanziert und somit der Öffentlichkeit nicht zugänglich. Aus diesen Arbeiten lässt sich ableiten, dass bei den heute verwendeten Maschinentypen der weitaus grösste Teil der benötigten Energie durch Verluste im Hydrauliksystem entsteht und nur ein geringer Teil (- 5 - 20 %) direkt zum Aufschmelzen und Verpressen des Kunststoffs benötigt wird.

4.2 Bildung und Zusammenstellung der Arbeitsgruppe

Die Betriebe, die in der Schweiz das Kunststoffspritzgiessen anwenden, unterscheiden sich in zweierlei Hinsicht.

- Grösse der Maschinen

Einige Betriebe sind auf grosse Teile spezialisiert und verfügen über entsprechend grosse Maschinen, andere Betriebe beispielsweise auf hochpräzise Kleinteile. Die Grösse der Maschinen (elektr. Anschlussleistung) schwankt etwa um den Faktor 1 : 10, wobei die meisten Maschinen im mittleren Bereich liegen.

- Die Anzahl der Maschinen

Kleinere Betriebe oder Betriebe, die noch andere Fertigungsverfahren anwenden, verfügen oft nur über wenige Spritzgiessmaschinen, grössere Betriebe können bis über 50 Maschinen aufweisen.

In den meisten Betrieben werden viele unterschiedliche Teile hergestellt, so dass die Maschinen universell eingesetzt werden müssen und entsprechend oft umgerüstet werden.

Bei der Auswahl der Arbeitsgruppenmitglieder wurde darauf geachtet, dass - Betriebe mit Maschinen unterschiedlicher Kapazität vertreten waren

- ein Betrieb mit einem verwandten Fertigungsverfahren (Kalandrieren) vertreten war, um die Übertragbarkeit der Aussage auf die gesamte Branche zu testen

- ein Vertreter einer Herstellerfirma miteinbezogen wurde

Die Auswahl der Arbeitsgruppenmitglieder erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem Verband der Schweizerischen Kunststoff-, Press- und Spritzwerke, dessen Geschäftsführer ebenfalls in der Arbeitsgruppe integriert wurde.

Firma	Anzahl Spritzgiess-Maschinen	Jährlicher Stromverbrauch Mio. kWh	Funktion des an der Arbeitsgruppe teilnehmenden Vertreters
1	50	2	Leiter Technische Dienste
2	30	5	Leiter Werksingenieurwesen
3	50	4	Technischer Leiter
4	9 Extruder 2 Kalandrierer	4	Leiter Kunststoffverarbeitung
5	Spritzgiessmaschinen-Hersteller		Direktor Technik
6	Verband der Schweizerischen Kunststoff- Press- und Spritzwerke		Geschäftsführer VSKPS

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über die teilnehmenden Firmen.

Tabelle 1 : Übersicht über die Mitglieder der Arbeitsgruppe Kunststoffspritzgiessen

4.3 Zieldefinition

An der ersten Arbeitsgruppensitzung wurde über den Energieverbrauch beim Kunststoffspritzgiessen diskutiert und darüber ob Kennzahlen dazu dienen können den Fertigungsprozess zu bewerten. Es wurden mehrere Ziele genannt, die mit der Bildung von Kennzahlen erreicht werden sollten:

- Vergleich von verschiedenen Maschinen

Durch maschinenspezifische Kennzahlen wäre es möglich verschiedene Maschinen zu vergleichen. Für ein bestimmtes zu fertigendes Teil könnte dann die effizienteste Maschine ausgewählt werden. Beim Kauf einer neuen Maschine könnte der spezifische Energieverbrauch als ein Entscheidungskriterium nützlich sein.

- Aufspüren von Sparpotentialen

Durch das Aufzeigen der wichtigsten Parameter, von denen der spezifische Energieverbrauch einer Maschine abhängt, könnte dieser optimiert werden. Die Parameter mit dem grössten Einfluss auf den Energieverbrauch dürften sein: der verarbeitete Kunststofftyp, die Verarbeitungstemperatur, die Schneckendrehzahl, der Schliessdruck, die Zykluszeit, das Gewicht des Teils, der Anteil Anguss (= Abfall) u.v.m.

- Motivation

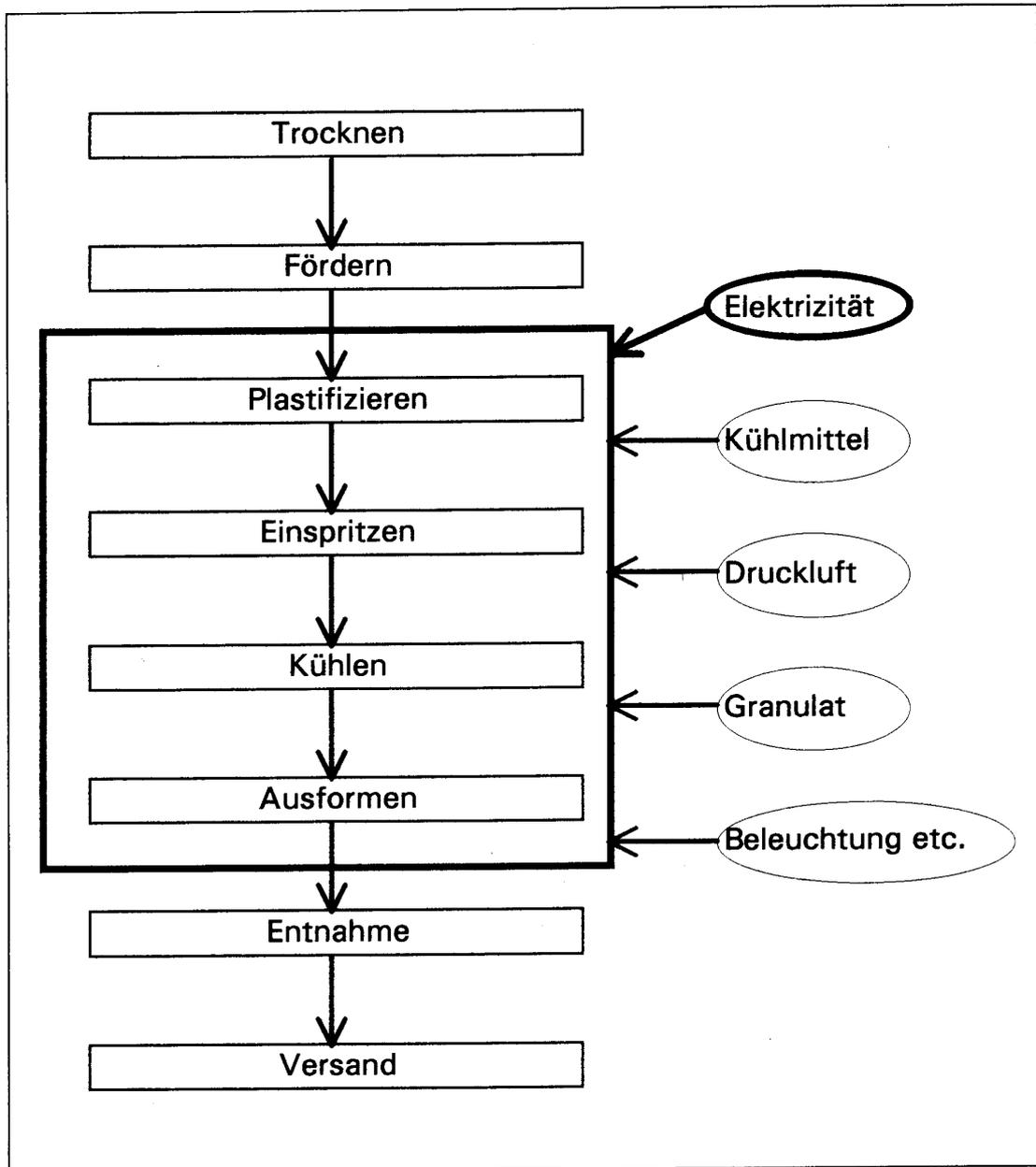
Durch entsprechende Kennzahlen könnte der Energieverbrauch des Betriebes überwacht und die Mitarbeiter zum Energiesparen motiviert werden.

- Optimierung von betrieblichen Abläufen

Ebenfalls einen Einfluss auf den Energieverbrauch hat die Betriebsorganisation, durch die die Nebenzeiten der Maschinen (Aufwärmeverfahren, Abschalten etc.) mitbestimmt werden.

4.4 Die Eingrenzung auf den Prozess

Figur 3 zeigt auf der linken Seite die wichtigsten Prozessschritte und auf der rechten Seite die verwendeten Energie- und Materialinputs.



Figur 3: Systemabgrenzung Kunststoffspritzgießen

Da die Kennzahl mit möglichst einfachen Mitteln gebildet und nur der Fertigungsprozess selber betrachtet werden sollte, wurden folgende Systemabgrenzungen gewählt:

- Es werden nur die Teilprozesse, die in einer Maschine ablaufen betrachtet. Dies sind: Plastifizieren, Einspritzen, Kühlen, Ausformen.
- Die Maschine wird als Ganzes betrachtet. Eine Aufteilung der Verbräuche auf die Prozessschritte (siehe Figur 3) sollte nicht erfolgen.
- Es sollte nur der Verbrauch an Elektrizität betrachtet werden. Alle anderen in den Prozess eingebrachte Energien wurden ausgeklammert, ebenso die Energieformen, in welche die Elektrizität innerhalb der Maschine umgewandelt wird.
- Es sollten nur einmalige Messungen der Verbräuche vorgenommen werden, d.h. es war eine einmalige Messaktion zu planen und durchzuführen.
- Der Normalbetrieb sollte über einen Zeitraum von 2 Wochen betrachtet werden, ohne jegliche Einschränkung des Produktionsbetriebs.

Nach einer eingehenden Diskussion mit dem Leiter der Fertigung wurden drei Maschinen bestimmt, an denen die Messungen vorgenommen werden sollten. Die wichtigsten Daten der Maschinen sind in Tabelle 2 von Seite 25 aufgeführt.

Maschine		Nr. 5	Nr. 42, 43
Hersteller		Arburg	Arburg
Typ		Allrounder A 170 CMD vollhydraulisch	Allrounder A 220 - 40 - 350 vollhydraulisch
Internationale Grösse		150 - 45	350 - 40
Baujahr		1988	1983 / 1984
Steuerung		Dialogica	Hydronica
Schneckenlänge	[mm]	378	450
Schneckendurchmesser	[mm]	22	25
max. Schneckenweg	[mm]	75	95
Leistung der Pumpe	[kW]	5,5	11
max. Heizleistung (Heizbänder und Düsenhei- zung)	[W]	3 x 730 + 300 = 2490	3 x 1050 + 310 = 3460
Installierte Gesamtleistung	[kW]	8,2	14,5
max. Schliesskraft	[kN]	150	350
max. Spritzdruck ¹⁾	[bar]	1700	1.860
max. Staudruck	[bar]	350	290
max. Schneckendrehzahl ¹⁾	[1/min]	430	460
max. Dosiervolumen	[cm ³]	28	47
max. Einspritzstrom	[cm ³ /s]	57	64

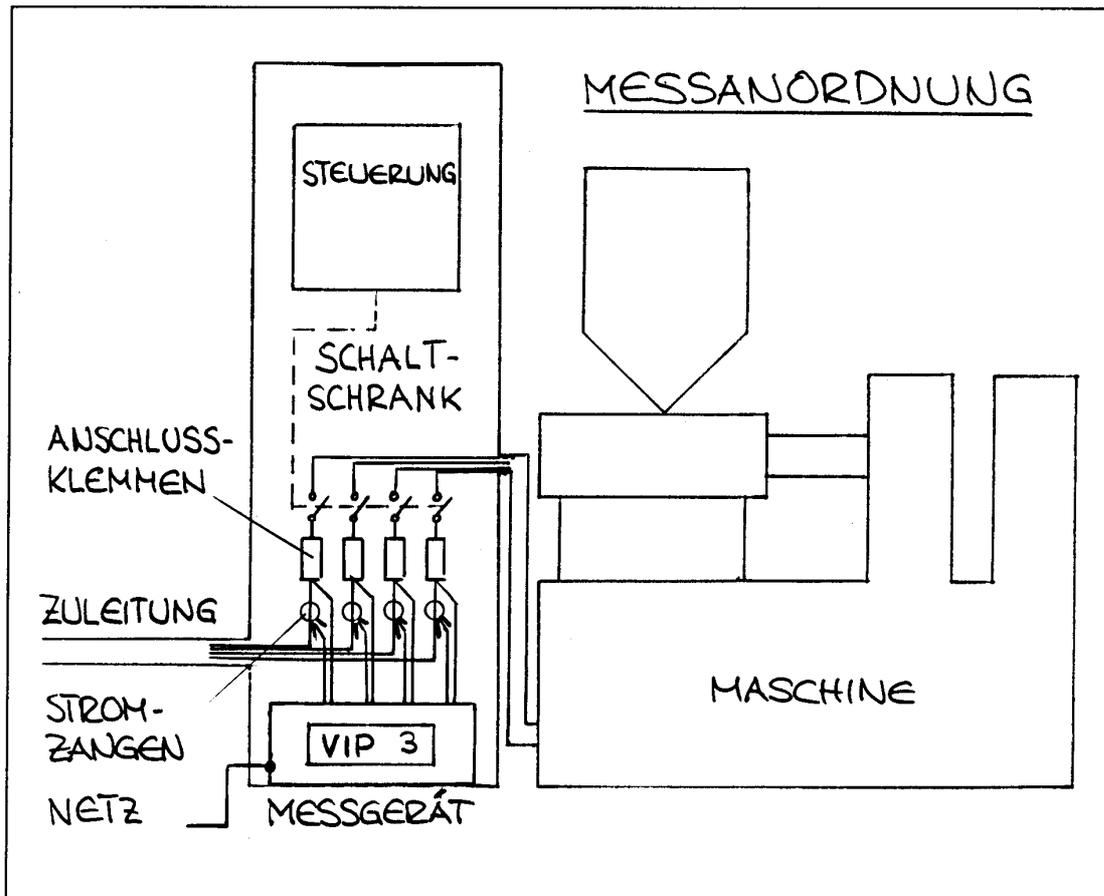
¹⁾ bei Schneckendurchmesser 25 mm

Tabelle 2: Die wichtigsten Daten der untersuchten Maschinen 1 - 3

4.5 Festlegung der Messgrössen

Aufgrund der Systemabgrenzung und unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten konnten die Messstellen und -grössen festgelegt werden. Als geeignete Messstelle erwies sich die Stromzuführung zum Schaltschrank der Maschinen. In den Schaltschränken war der Platz vorhanden, um die zuführenden Stromleitungen mit einem Zangenampèremeter abzugreifen. So können die für die Fragestellung relevanten Messgrössen, die über die Zeit von der Maschine aufgenommene Wirkund Blindarbeit gemessen werden. Die Messgeräte konnten so im Schrank untergebracht werden, dass diese den Fertigungsablauf in keiner Weise behinderten.

Es wurde ein modernes programmierbares Messgerät gewählt, welches über einen Zeitraum von 10 Tagen alle fünf Minuten die geforderten Messwerte speichern kann. Die Messwerte können auf eine Diskette übertragen und mit einem Tabellenkalkulationsprogramm auf dem PC weiterverarbeitet werden.



Figur 4: Messanordnung an einer Kunststoffspritzgiessmaschine

4.6 Die Wahl der Bezugsgrößen

Für die Aussage einer Kennzahl ist die Wahl der Bezugsgrösse entscheidend.

Je nach Fragestellung muss daher eine andere Bezugsgrösse gewählt werden. Bei der Wahl der Bezugsgrösse ist ferner darauf zu achten, dass diese nach Möglichkeit bereits erfasst wird oder sich an vorhandenen Statistiken ableiten lässt. Sie sollte in der gleichen zeitlichen Auflösung vorliegen wie die Messdaten. Unter Berücksichtigung der vorhandenen Betriebsstatistiken wurden daher die folgenden Bezugsgrößen gewählt:

- Anzahl gefertigte Teile: für jedes Produktionslos ist die Anzahl der gefertigten Teile in der Auftragsbegleitkarte festgehalten.

- Menge verarbeiteter Kunststoff: ebenfalls aus der Auftragsbegleitkarte
- Menge (Gewicht) fertige Teile: aus Einstellbericht mal Anzahl Teile.
- Laufzeiten: aus Messprotokoll und Messaufzeichnung
- Zykluszeit: aus Einstellbericht

4.7 Durchführung der Messungen an drei Maschinen

Dadurch die Messungen der ungestörte, all tägliche Produktionsablauf dokumentiert werden sollte, musste alles vermieden werden, was den Produktionsprozess und die daran beteiligten Personen (Maschineneinrichtungen, Schichtführer etc.) behindern könnte.

Die drei Messgeräte wurden an einem Morgen in ca. einstündiger Arbeit montiert und programmiert.

Die vorbereiteten und vorher ausgetesteten Listen wurden an den Leiter der Fertigung verteilt: Darin wurden für alle Begriffe die im Betrieb übliche Terminologie verwendet:

- Beschreibung der gefertigten Teile und der Maschineneinstellungen (Figur 5). Hier sind die wichtigsten Einstellungen der Maschine zur Fertigung eines bestimmten Teils festgehalten. Alle Werte sind im Einstellbericht zu finden, der bei der Bemusterung eines Teils/Werkzeugs erstellt wird.

- Gefertigter Auftrag (Figur 6)

Hier sind die wichtigsten Spezifikationen des jeweiligen Auftrages einzutragen. Alle Werte stammen aus der Auftragskarteikarte des jeweiligen Auftrages.

- Messprotokoll (Figur 7)

Das Messprotokoll war das einzige Dokument welches direkt an der Maschine auszufüllen war. Die Eintragungen waren auf die notwendigsten Grössen beschränkt, um die Messwerte richtig interpretieren zu können. Eintragungen sollten nur vorgenommen werden, wenn irgendeine Veränderung an der Maschine notwendig wurde.

Nach zehn Tagen wurden die Messgeräte wieder ausgebaut. Vorher wurde bei einer Maschine noch eine stufenweise Reduktion des Schliessdrucks vorgenommen und dabei weitere Daten aufgenommen. Während der Messung kam es zu keinerlei Beeinträchtigungen des Produktionsablaufs durch die Messeinrichtungen.

A 220

Nr. 42

10.7.91
K. Frei

AL - Oberkeil

Beschreibung der gefertigten Teile und der Maschineneinstellungen
(aus Einstellbericht)

A Beschreibung Spitzteil Bezeichnung: Zeichn.-Nr.: Werkzeug-Nr.: Werkzeugnester: Anguss: Anschnitt: Einlegeteile: Material pro Abguss: Material pro Anguss: Teilgewicht: Spritzgiessmasse Typ: Handelsname: Bezeichnung: Korn: Farbe: getrocknet: Muster/Foto:	AL-Oberkeil 1.5003 29-018 Stange Turmel mit/ohne 21,54 g 2,52 19,01 PC Horklebin SF 300 9101 07-334 ja/nein 120° 5 h
B Maschineneinstellungen Verwendete Maschine: Maschinen-Nr.: Zylinder φ: Zylinder/Schneckenausführung: Düsen- und Zylindertemperaturen: - Düse - Düsens. - : - : - Einzug Werkzeugtemperaturen - beweglich - fest	A 220 42 A1614 540 340 320 300 50° } mit AB-Therm 50°
Schleissdruck/Schleisskraft Spritzgeschwindigkeit V3 Dosierdrehzahl V4 Spritzdruck V5 p2 p3 p4 Staudruck p5	150 bar 80 35% = 240 83% 20% 16% 25%
Zykluszeit t1 Abkühlzeit t5	37,9

Figur 5: Erfassungsblatt zur Beschreibung der gefertigten Teile und der Maschineneinstellungen

A 220 Nr. 42 10.7.91
AL-Oberteil Pfeil

Gefertigter Auftrag
(aus Auftragsbegleitkarte)

Starttermin	8.7.91
Endtermin	19.7.91
Spritzteil-Bezeichnung	AL-Oberteil 20
Zeichnungs-Nr.	1.5003
Interne Nr.	900010.97
Anzahl gefertigte Teile (ohne Ausschuss)	14448
benötigte Kunststoffmenge	317 kg
Art-Nr.	2003
Kurz-Bezeichnung	PC
Ausschuss evtl. Begründung Besonderheiten / Bemerkungen	

Figur 6: Erfassungsblatt gefertigter Auftrag

A 220 Nr. 42 ^{10.7.91} _{R. Hej}
AL-Oberteil

42/1

Messprotokoll

- bei jeder ^{Störung} Kontrolle / Veränderung an Maschine,
Zeit, Zählerstand und Vorgang notieren

Maschinen-Nr.

Datum	Zeit [Stunde/Min.]	Zählerstand	Vorgang
10.7.91	11:20	2258	neu anfahren
"	12:25	2327	627
11.7.91	10:30	4430	627
"	13:00	4630	627
12.7.91	05:12	5747	627 abgestellt
"	05:35	"	neu anfahren
13.7.91	05:12	8155	abgestellt
15.7.91	05:25	8155	Vorwärmen
15.7.91	08:20	"	neu anfahren
16.7.91	09:45	10700	627
17.7.91	07:00	12687	627
17.7.91	04:20	16706	102 Kern ausgebaut
			Wartung!

Figur 7: Messprotokoll

4.8 Bildung und Interpretation der Kennwerte

Nach Beendigung der Messungen werden die Daten der Messgeräte auf Disketten überspielt (11 Stück!) und dann auf einem gewöhnlichen PC mit einem Tabellenkalkulationsprogramm (Excel) ausgewertet. Die Auswertung erfolgte in zwei Schritten: ,

- grafische Auswertung der 5-Minuten-Verbräuche

In den Grafiken sind die 5-Minuten-Verbräuche auf Durchschnitts-Stunden-Werte (kWh/h), das heisst, auf einen durchschnittlichen Leistungsbedarf (in kW) hochgerechnet dargestellt.

- Bildung von Kennwerten und deren grafischen Darstellung

Grafische Auswertung der 5-Minuten-Verbräuche (siehe Figur 8 bis 13)

Maschine 42 (Figur 8)

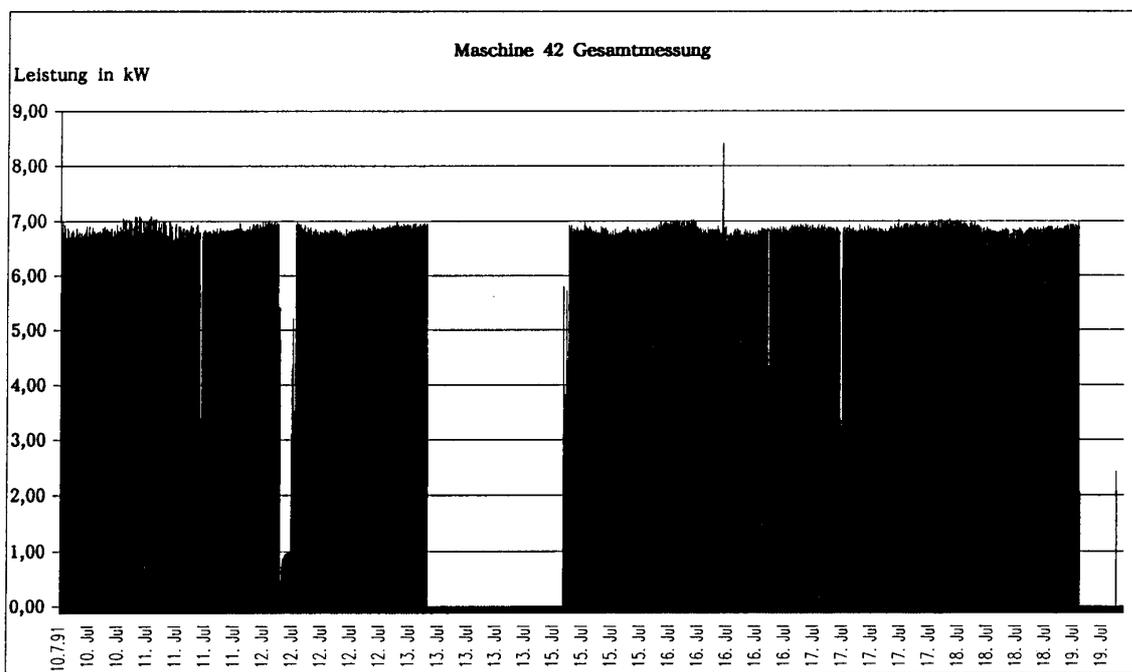
Auf dieser Maschine wurde während der gesamten Messperiode immer das gleiche Teil gefertigt.

Der durchschnittliche Leistungsbedarf während der Produktion liegt bei knapp 7 kW, was etwa der Hälfte der installierten elektrischen Gesamtleistung entspricht.

Gut erkennbar ist die Produktionspause am Wochenende vom Samstag, 13. Juli 1991, 05.00 Uhr bis am Montag, 15. Juli 1991, 04.45 Uhr und das Abbrechen infolge Werkzeugbruch am 19. Juli ~ 01.15 Uhr

Die Messreihe ist von kleineren Einschnitten unterbrochen, die durch Störungen bedingt sind, die längste Störung, am 12. Juli konnte erst nach ca. drei Stunden behoben werden. Interessant ist auch die Störung vom 16. Juli, bei der der Leistungsbedarf der Maschine auf ca. 8,5 kW anstieg.-

Ansonsten ist der durchschnittliche Leistungsbedarf nur geringen Schwankungen unterworfen, vor allem in den Morgen-



stunden scheinen die Werte etwas höher als unter Tag zu liegen.

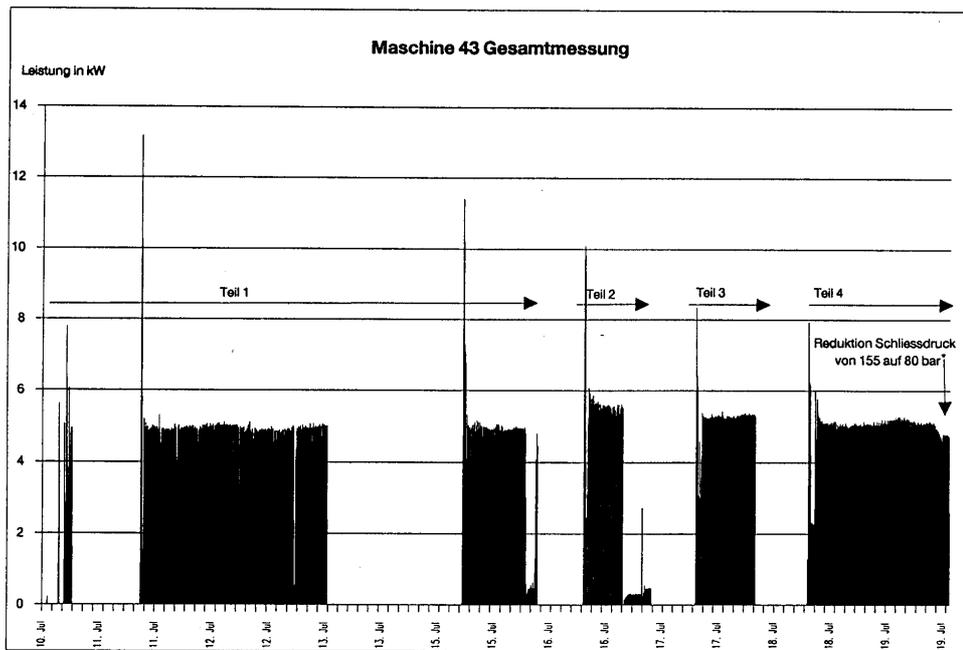
Figur 8: Maschine 42 Gesamtmessung

Maschine 43 (Figur 9 und 10)

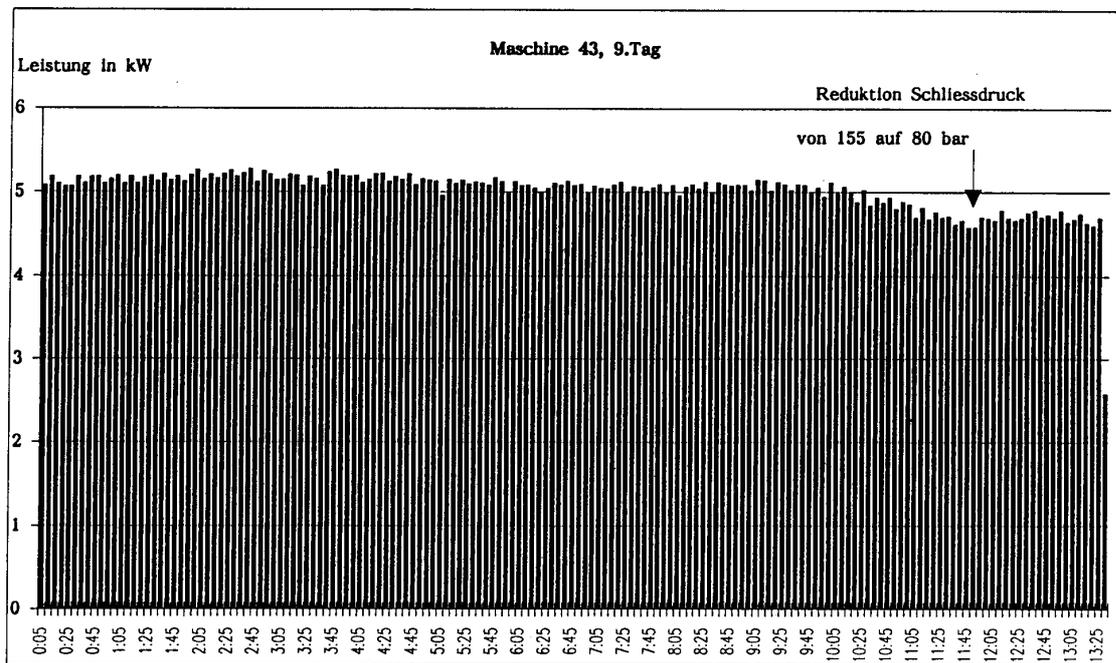
Auf dieser Maschine wurden während der Versuchsdauer vier unterschiedliche Teile gefertigt.

- Bei allen Teilen lag der durchschnittliche Leistungsbedarf etwa bei 4,5 kW (25 % der elektrischen Gesamtleistung der Maschine).
- Auffallend ist die hohe Anfahrtspitze, die bei jedem Fertigungsblock auftritt und bis zum 3-fachen der Durchschnittswerte beträgt. Die Spitze dauert jeweils 10 - 30 Minuten und ist in der Regel von einer ebenso langen Periode unterdurchschnittlichen Leistungsbedarfs gefolgt.
- Nach Erreichen der Sollstückzahl wurde am 15. und 16. Juli jeweils die Maschine erst einige Stunden später abgeschaltet.
- die Messreihe vom 19. Juli ist vergrößert dargestellt. Zwischen 10.00 Uhr und 12.00 Uhr wurden schrittweise der Schliessdruck von 155 auf 80 ar verringert .

In der Graphik deutlich erkennbar ist eine damit verbundene Reduktion der Stromaufnahme von ca. 5,1 kW auf 4,6 kW, also eine Ersparnis von fast 10



Figur 9: Maschine 43 Gesamtmessung



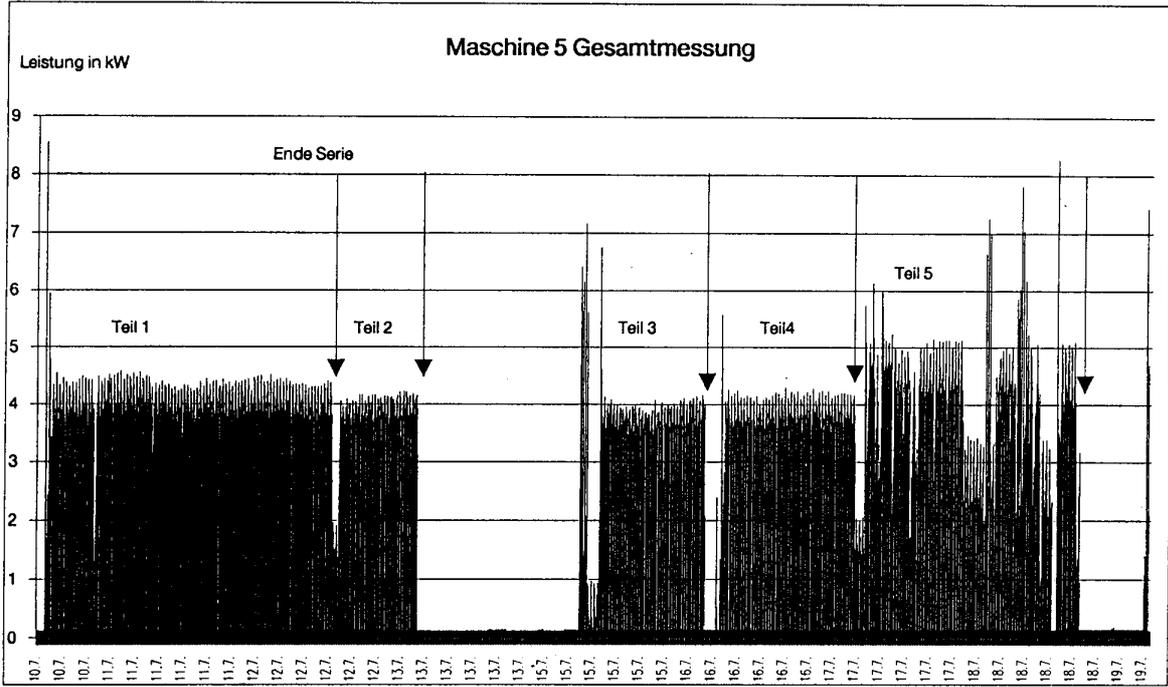
Figur 10: Maschine 43, 9. Tag

Maschine 5 (Figur 11 - 13)

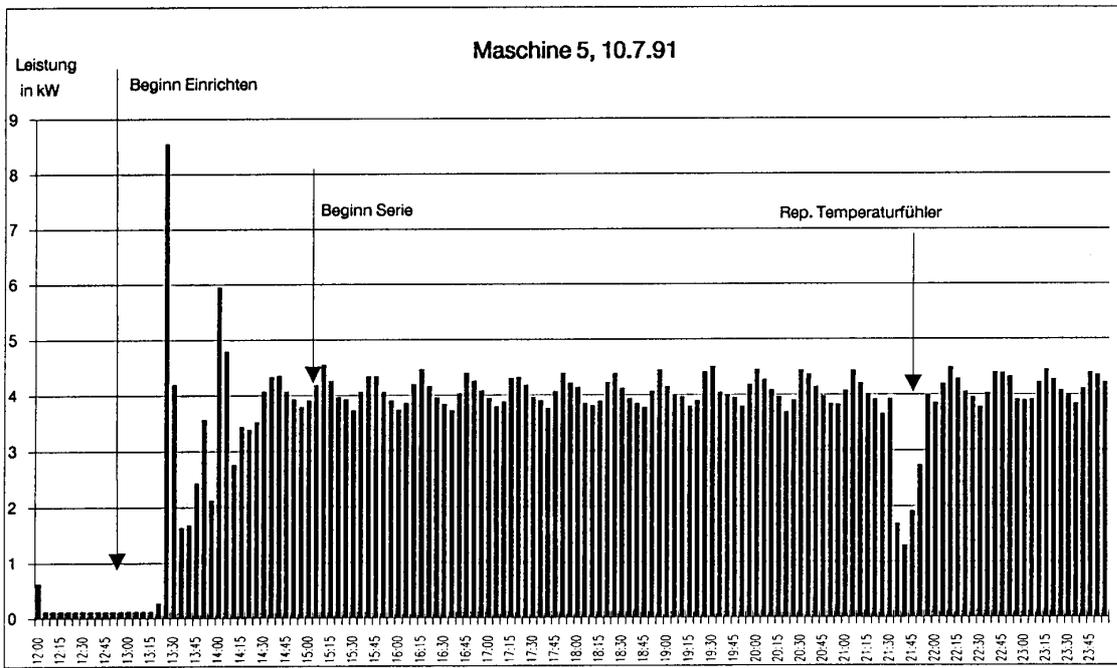
Auf dieser Maschine wurden fünf unterschiedliche Teile gefertigt.

Hier fällt auf:

- Die Durchschnittsleistung während der Produktion liegt bei ca. 4 kW, = 50 % der installierten Gesamtleistung der Maschine.
- Die Messwerte sind stärkeren Schwankungen unterworfen als bei den beiden anderen Maschinen. Wie aus dem Bild 12 (vom 10.7.91 von 14.00 - 24.00 Uhr) deutlich wird, sind diese Schwankungen sehr gleichmässig. Eine Periode dauert ca. 32 Minuten. Der Höchstwert liegt ca. 16 % über dem Tiefstwert.
- Auch hier ist beim Einschalten ein Einschwingen zu beobachten, wobei der Anfahr 5-Minuten-Wert ca. doppelt so hoch ist wie der zur Produktion benötigte Wert.
- Auch im abgeschalteten Zustand hat die Maschine einen Stromverbrauch von täglich ca. 3,5 kWh!
- Bei der Fertigung von Teil 5 kam es zu zahlreichen Störungen (vor allem beim Materialeinzug), diese führten zu starken Schwankungen der 5-Min.-Stromverbräuche, wobei zahlreiche hohe Spitzen auftraten und längere Täler mit einem mittleren Verbrauch. Auch scheinen die rhythmischen Schwankungen noch stärker ausgeprägt.



Figur 11: Maschine 5 Gesamtmessung



Figur 12: Maschine 5, 10.7.91

Bildung und Interpretation von Kennwerten

In der Tabelle 3 "Auswertung der Messungen" sind die Bezugsgrößen, die gemessenen Werte und die berechneten Kenngrößen für jedes gefertigte Teil dargestellt.

Maschinen-Nr.		42	43	43	43	43	5	5	5	5	5
Teil Nr.		1	1	2	3	4	1	2	3	4	5
Bezugsgrößen											
Anzahl Teile	Stück	14.448	165.000	2.200	2.200	37.380	21.400	10.448	14.084	19.300	18.100
Teile pro Abguss	Stück	1	16	2	1	6	2	4	4	4	8
Zykluszeit	sec.	37,9	17,6	25,4	18,7	15,4	15,6	19,0	17,9	17,0	53,0
Gewicht pro Teil	g	19,01	0,10	7,50	11,61	0,73	0,26	1,17	1,17	0,49	0,80
Teilegewicht pro Abguss	g	19,01	1,53	15,00	11,61	4,38	0,52	4,68	4,68	1,96	6,40
Material pro Abguss	g	21,54	9,58	17,52	14,42	7,23	1,23	8,25	8,25	3,21	9,20
Kunststoff	PC		PA 6	PA	PA	PA		PETB		SAN	
Düsentemperatur	° C	350	260	255	280	270	210	250	250	240	310
gemessene Werte											
Stromverbrauch Total	kWh	1664,6	271,6	49,7	66,4	142,9	196,9	53,5	74,8	89,2	141,2
Stromverbrauch Produktion	kWh	1654,0	251,1	42,4	60,6	135,1	190,2	51,9	66,7	87,4	127,6
Fertigungszeit Total	min.	9450	3300	495	760	1707	2910	870	1260	1410	2240
Fertigungszeit Produktion	min.	9660	3110	465	685	1600	2790	825	1050	1365	2000
berechnete Kennwerte											
spezifischer Verbrauch netto pro											
-Teil	Wh/Teil	114,5	1,5	19,3	27,6	3,6	8,9	5,0	4,7	4,5	7,0
-Zyklus	Wh/Zyk.	114,5	24,4	38,5	27,6	21,7	17,8	19,9	19,0	18,1	56,4
-Gramm Teil	Wh/g	6,0	15,9	2,6	2,4	5,0	34,2	4,2	4,1	9,2	8,8
-Gramm Material	Wh/g	5,3	2,5	2,2	1,9	3,0	14,5	2,4	2,3	5,6	6,1
-Produktionszeit	kW	10,3	4,8	5,5	5,3	5,1	4,1	3,8	3,8	3,8	3,8
stündl. verarb. Kustomenge	kg/h	2,0	2,0	2,5	2,8	1,7	0,3	1,6	1,7	0,7	0,6
Stromverbr. Nebenzeiten	kWh	10,6	20,5	7,3	5,8	7,8	6,7	1,6	8,1	1,8	13,7
Stromverbr. Nebenzeiten	%	0,6	7,5	14,7	8,7	5,4	3,4	3,0	10,8	2,0	9,7
Gew. Teil/Gew. Material		0,9	0,2	0,9	0,8	0,6	0,4	0,6	0,6	0,6	0,7
Anteil Abfall	%	12	84	14	19	39	58	43	43	39	30

Tabelle 3: Auswertung der Messungen vom 10.7.1991 bis 19.7.1991

Die Bezugsgrößen wurden aus den Datenblättern "Beschreibung der gefertigten Teile und der Maschineneinstellung" und "Gefertigter Auftrag" entnommen.

Die gemessenen Werte sind die gemessenen und aufsummierten 5-Min.-Stromverbräuche einerseits und die aus den Messprotokollen entnommenen Fertigungszeiten andererseits. Im einzelnen:

- Stromverbrauch Total: Stromverbrauch vom Beginn des Einrichtens der Maschine bis zum Abschalten nach Beendigung der Serie.

- Stromverbrauch Produktion: Stromverbrauch nur während der eigentlichen Produktion des jeweiligen Teils, also ohne Einrichten, Warmlaufen, Störungen etc.

Fertigungszeit Total: Zeit vom Beginn des Einrichtens der Maschine bis zum Abschalten.

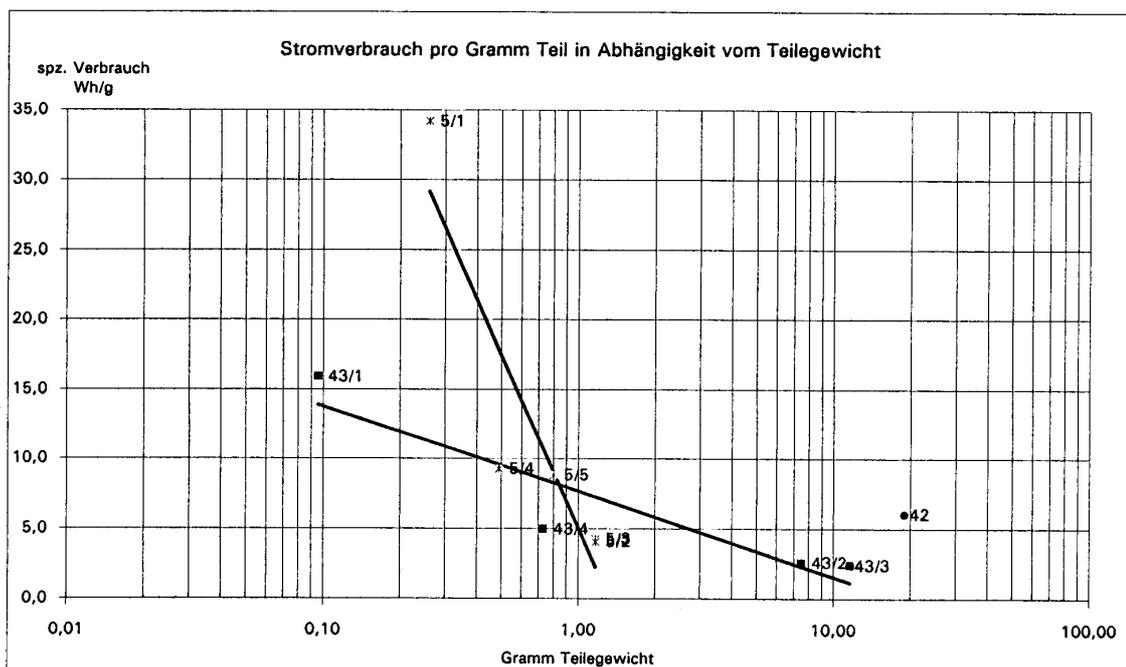
Fertigungszeit Produktion: analog Stromverbrauch Produktion.

Die berechneten Kennwerte wurden durch Division der gemessenen Werte durch verschiedene Bezugsgrößen gebildet. Im einzelnen:

- spezifischer Verbrauch netto pro Teil: Stromverbrauch Produktion dividiert durch Anzahl Teile
- spezifischer Verbrauch netto pro Zyklus: (Stromverbrauch Produktion dividiert durch Fertigungszeit Produktion) x Zykluszeit
- spezifischer Verbrauch netto pro Gramm-Teil: Stromverbrauch Produktion dividiert durch (Gewicht pro Teil x Anzahl Teile)
- spezifischer Verbrauch netto pro Gramm Material: Stromverbrauch Produktion dividiert durch (Material pro Abguss x (Anzahl Teile dividiert durch Teile pro Abguss))
- spezifischer Verbrauch netto pro Produktionszeit: Stromverbrauch Produktion dividiert durch Fertigungszeit Produktion (kWh/h - kW)
- stündlich verarbeitete Kunststoffmenge: Material pro Abguss x (3600 sec/h dividiert durch Zykluszeit [sec])
- Stromverbrauch Nebenzeiten absolut: (Stromverbrauch Total minus Stromverbrauch Produktion)
- Stromverbrauch Nebenzeiten relativ: «Stromverbrauch Total minus Stromverbrauch Produktion) dividiert durch Stromverbrauch Total) x 100
- Gewicht Teil/Gewicht Material: Teilgewicht pro Abguss dividiert durch Material pro Abguss
- Anteil Abfall: «Material pro Abguss minus Teilgewicht pro Abguss) dividiert durch Material pro Abguss) x 100

Die Interpretation der Kennwerte erfolgte mittels Graphiken, bei denen die Kennwerte jeweils in Abhängigkeit eines Parameters dargestellt wurden. Hierdurch lässt sich anschaulich überprüfen, ob eine Abhängigkeit der Kenngrösse von dem jeweiligen Parameter besteht und wie diese Abhängigkeit ausgebildet ist. Die Kennwerte der Teile die auf der Maschine 5 hergestellt wurden und diejenigen der Maschine 42 und 43 sind in einer Graphik zusammengefasst. Zum Teil musste für das Gewicht ein logarithmischer Massstab verwendet werden, da die Teile sehr unterschiedlich gross waren. Die Zahl der Messpunkte lässt in den meisten Fällen einen funktionalen Zusammenhang nur grob erkennen, um genauere Kurven bestimmen zu können, wäre eine grössere Anzahl Messwerte notwendig.

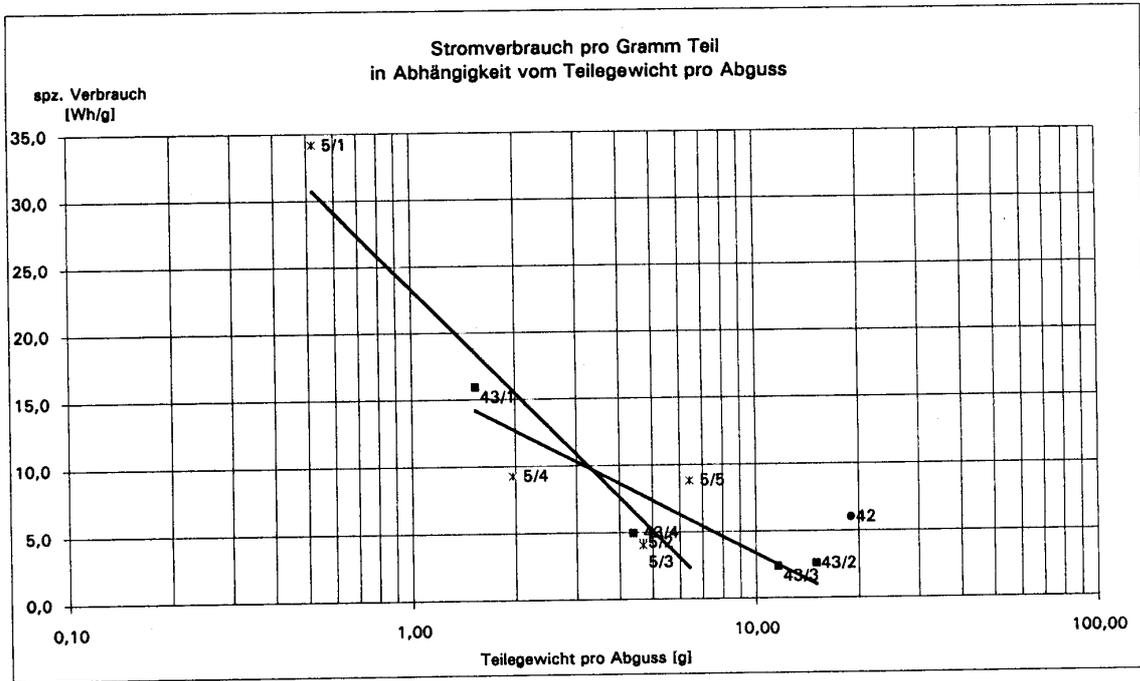
Die in den Figuren 14 bis 20 dargestellten Kurven sind daher nur als Prinzipdarstellung zu verstehen. Sie sollen zeigen wie die Kennwerte dargestellt werden können, um auf verschiedene Fragestellungen eine Antwort zu erhalten. Obwohl die Maschinen 42 und die Maschine 43 identisch waren, wurden die Werte der Maschine 42 nicht mit denen der Maschine 43 verbunden, da sie stark von diesen abweichen.



Figur 14: Elektrizitätsverbrauch pro Gramm Teil in Abhängigkeit vom Teilgewicht.

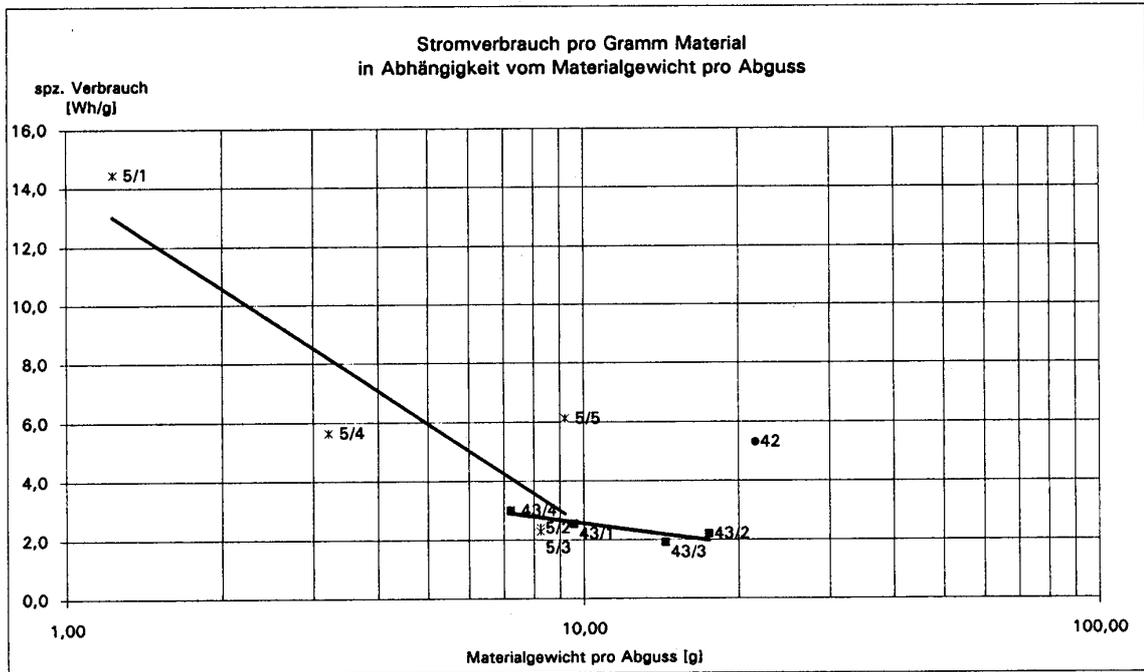
Diese Kennzahl bewertet den Elektrizitätsverbrauch zur Herstellung eines nach dem Gewicht bestimmten Teils. Er bezieht sich somit auf eine Eigenschaft des Endprodukts.

Bei den Maschinen 42 und 43 schwanken die Werte zwischen 16 Wh/g und 2,4 Wh/g, bei der Maschine 5 zwischen 34 und 4 Wh/g. Erwartungsgemäss wird zur Herstellung kleinerer Teile spezifisch mehr Energie benötigt als für grössere. Einzelne Punkte weichen stark von den eingezeichneten Kurven ab (Vorsicht: logarithmischer Massstab!), da noch weitere Parameter den spezifischen Verbrauch beeinflussen. So liegt der Wert des Punktes 42 (gleiche Maschine wie 43) deutlich über dem "Trend", was vermutlich durch die hohe Verarbeitungstemperatur (350' C) des Kunststoffes erklärt werden kann.



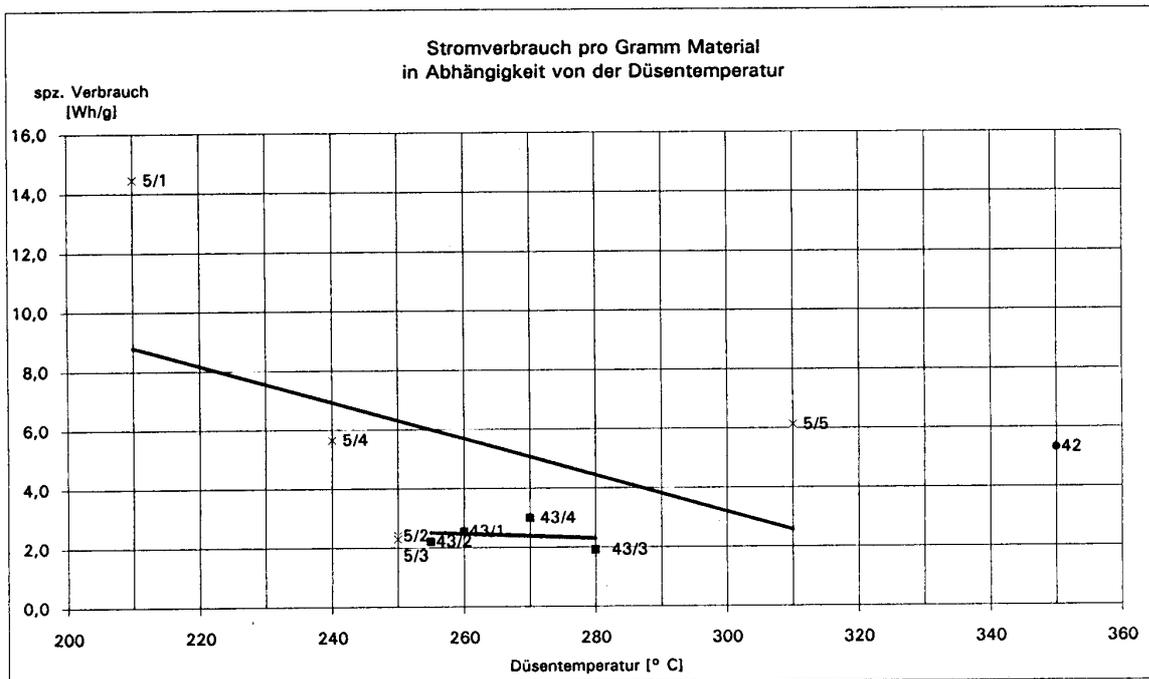
Figur 15: Elektrizitätsverbrauch pro Gramm Teil in Abhängigkeit vom Teilgewicht pro Abguss.

Dieser Kennwert berücksichtigt zusätzlich, ob das Werkzeug mehrere Formnester aufweist, bezieht also eine Eigenschaft des Werkzeugs mit ein. Die Kennwerte an sich sind die gleichen wie in der vorigen Graphik, jedoch hat sich zum Teil die Reihenfolge geändert. Auch hier ist ein eindeutiger Rückgang des spezifischen Verbrauchs mit steigendem Teilgewicht pro Abguss erkennbar. Der Wert "42" liegt wieder deutlich zu hoch, aber auch der Wert 5 der Maschine 5 liegt deutlich über dem Trend. Auch bei diesem Teil liegt die Verarbeitungstemperatur mit 3100 deutlich höher als bei den anderen Messpunkten (210 - 250° C).



Figur 16: Verbrauch pro Gramm Material in Abhängigkeit vom Materialgewicht pro Abguss.

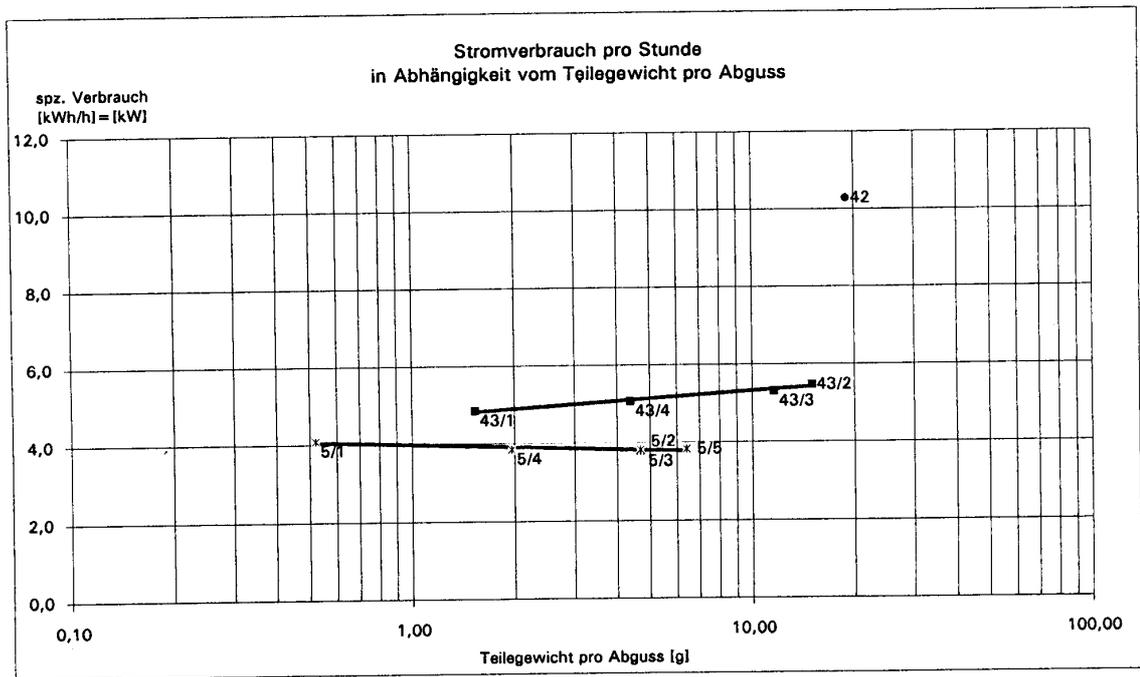
Dieser Kennwert bewertet den Energieaufwand zum Verarbeiten einer bestimmten Materialmenge, ohne den Verlust an Material (den Abguss) zu berücksichtigen. Ein ungünstig konstruiertes Werkzeug kann mit dieser Zahl nicht identifiziert werden. Bei den Maschinen 42 und 43 schwankt der Kennwert zwischen 1,9 und 5,3 Wh/g, bei der Maschine 5 zwischen 2,3 und 14,5 Wh/g. Abgesehen von den beiden "Ausreißern" ist wieder ein deutliches Abnehmen des spezifischen Verbrauchs mit der Zunahme der pro Abguss verspritzten Materialmenge verbunden. Bei der Interpretation dieser Kennzahl ist zu beachten, dass Teile, die ein ungünstigeres Verhältnis eingesetztes Material zu Teilgewicht haben "belohnt" werden.



Figur 17: Verbrauch pro Gramm Material in Abhängigkeit von der Düsentemperatur

Die Werte 2, 1 und 4 der Maschine 43 lässt eine Abhängigkeit des spezifischen Verbrauchswertes von der Temperatur vermuten. Die Werte streuen jedoch stark, so liegt der Wert 3 liegt z.B. überraschend tief, so dass die resultierende Kurve keine Steigung mehr aufweist.

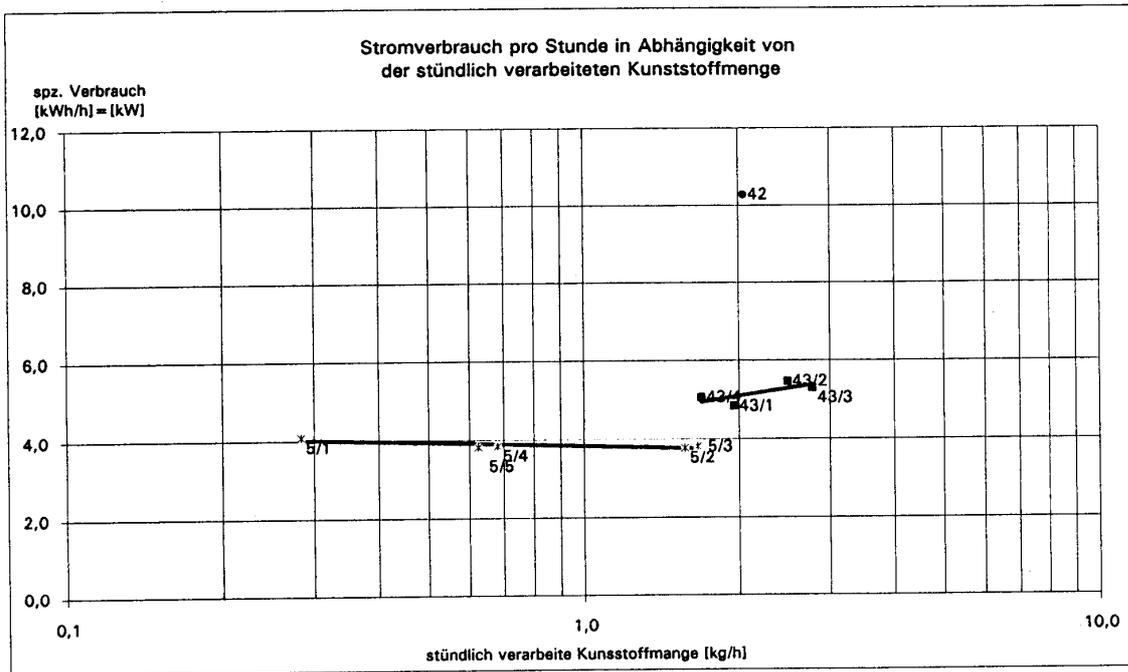
Für die Maschine 5 streuen die Werte noch stärker, so dass eine Abhängigkeit nicht mehr erkennbar ist, das Fallen der resultierenden Geraden ist nicht interpretierbar und widerspricht den Erwartungen. Vermutlich ist bei den Teilen 1 und 4 das Materialgewicht pro Abguss so gering, dass hier andere Faktoren dominieren.



Figur 18: Verbrauch pro Stunde in Abhängigkeit vom Teilgewicht pro Abguss.

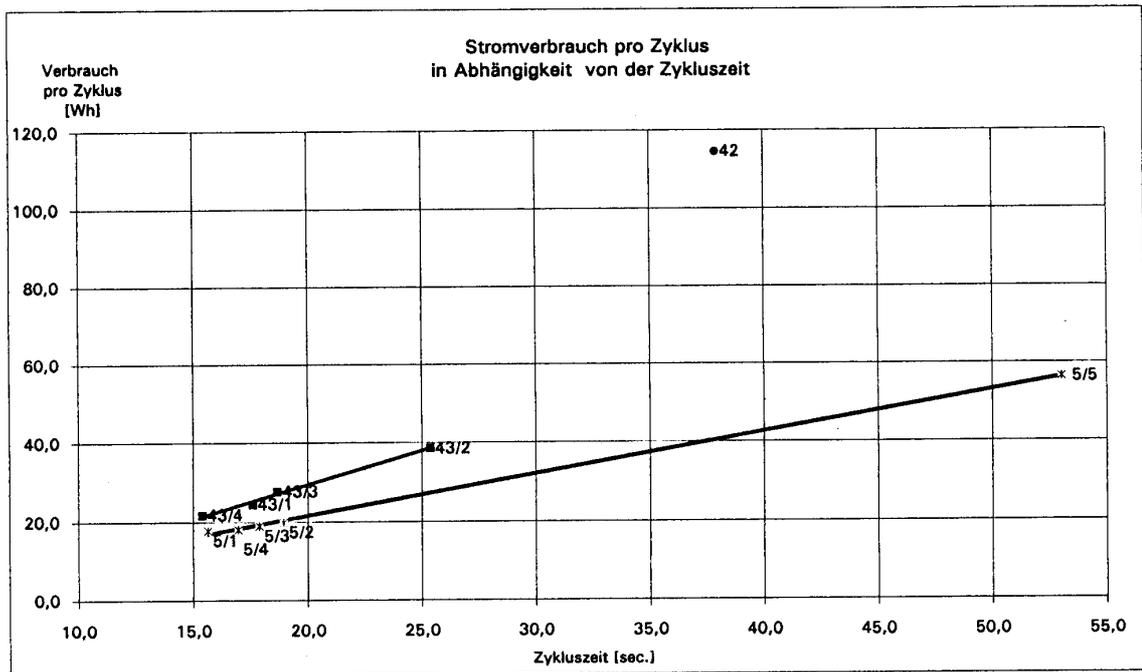
Der stündliche Stromverbrauch (= durchschnittliche Leistungsaufnahme) liegt bei der Maschine 43 zwischen 4,8 und 5,5 kW, bei der Maschine 5 bei ca. 4 kW und bei der Maschine 42 bei 10 kW.

Auffallend bei beiden Kurven ist, dass der stündliche Stromverbrauch praktisch unabhängig vom Teilgewicht pro Abguss ist. Der Stromverbrauch wird folglich vor allem durch die Wahl der Maschine bestimmt und nicht durch das Werkzeug, das Material oder die Form des Wertstücks.



Figur 19: Verbrauch pro Stunde in Abhängigkeit von der stündlich verarbeiteten Kunststoffmenge

Hier ergibt sich wieder für beide Maschinen der gleiche, quasi horizontale Verlauf der Kurven (Ausnahme "42"), was bedeutet, dass der Stromverbrauch praktisch nicht von der verarbeiteten stündlichen Kunststoffmenge abhängt, sondern unabhängig von dieser über die Laufzeit der Maschine quasi konstant ist. Selbst wenn die stündlich verarbeitete Kunststoffmenge gleich Null wäre, hätten die Maschinen eine unveränderte Stromaufnahme. Mit anderen Worten ist der Stromverbrauch praktisch ausschliesslich durch die Leerlaufverluste bedingt. Lediglich beim Teil 42 scheinen andere Faktoren zusätzlich den Stromverbrauch zu beeinflussen.



Figur 20: Verbrauch pro Zyklus in Abhängigkeit von der Zykluszeit

Der Verbrauch pro Zyklus entspricht dem stündlichen Verbrauch dividiert durch die Anzahl Zyklen pro Stunde. Da der Verbrauch pro Stunde annähernd konstant ist (siehe vorherige Graphik), ist somit der Verbrauch pro Zyklus umgekehrt proportional zur Zykluszeit. Diese Figur ist somit nur eine andere Darstellung des selben Sachverhaltes. Der spezifische Verbrauch schwankt zwischen 22 und 115 Wh/Zyklus bei den Maschinen 42 und 43 und 18 - 56 Wh/Zyklus bei der Maschine 5.

4.9 Umsetzung der Erkenntnisse

Zunächst kann festgestellt werden, dass allein die Diskussionen über die Möglichkeiten des rationellen Elektrizitätseinsatzes zu einer Sensibilisierung bei den beteiligten Unternehmen führte. Rationeller Energieeinsatz setzt den Willen aller Mitarbeiter eines Betriebes voraus und deren dauernde Aufmerksamkeit. Vor allem durch zahlreiche Einzelmassnahmen, die oft alles andere als spektakulär sind, können Erfolge erreicht werden.

Die Umsetzung der Erkenntnisse erfolgte daher zum Teil indirekt und lässt sich nicht alleine an einzelnen Massnahmen oder Aktionen quantifizieren.

Einzelne Punkte, zu deren Klärung die Bildung der Kennzahlen und die Diskussion in der Arbeitsgruppe beitrug, seien hier trotzdem hervorgehoben:

- Der Grundverbrauch (Stillstandsverluste) einer Maschine wird um so bedeutender, je mehr diese überdimensioniert ist. Aus energetischen Gründen sollte daher ein Teil auf der kleinstmöglichen Maschine produziert werden, bzw. ein Werkzeug so viele Formneuster haben, wie die vorgesehene Maschine verkraften kann.
- Moderne hydraulische Maschinen sind im Energieverbrauch etwa um den Faktor 2 günstiger als ältere Modelle. Eine vollelektrische Maschine ist nochmals um etwa 30 % günstiger. Problematisch ist allerdings der Preis, da eine vollelektrische Maschine heute etwa das Doppelte einer entsprechenden (einfachen) hydraulischen kostet. Ferner verursachen vollelektrische Maschinen kurzzeitig hohe Lastspitzen.
- Bei kleineren Maschinen dürfte die vollelektrische Maschine energetisch günstiger sein, insbesondere bei durch längere Kühlzeiten bedingten längeren Zykluszeiten. Bei Grossmaschinen, bei kurzen Zykluszeiten und hohen Einspritzleistungen werden die Vorteile hydraulischer Maschinen auch in Zukunft überwiegen.
- Ziel der Messungen und Kennwertbildung war es, für die Bemusterer/Einrichter Angaben darüber zu finden, welche Parameter welchen Einfluss auf den Energieverbrauch haben, d.h. wie durch die richtige Einstellung der Maschinen der Energieverbrauch optimiert werden kann. Aufgrund der Untersuchungen wurden in einer Firma die Einrichter angewiesen, den Schliessdruck zu minimieren, die Zykluszeiten so kurz und die Temperaturen so tief wie möglich einzustellen.
- Beim Vergleich der Firmen untereinander ist es eventuell vorteilhaft, die Veränderung der Kennzahlen durch bestimmte Massnahmen zu betrachten, da die absoluten Kennzahlen nur bei gleichem Maschinentyp und gleicher Maschinengrösse direkt vergleichbar sind.

5. DAS BEISPIEL BIERHERSTELLUNG

5.1 Beschreibung des Herstellverfahrens Stand des Wissens/Vorliegende Arbeiten/Kennziffern

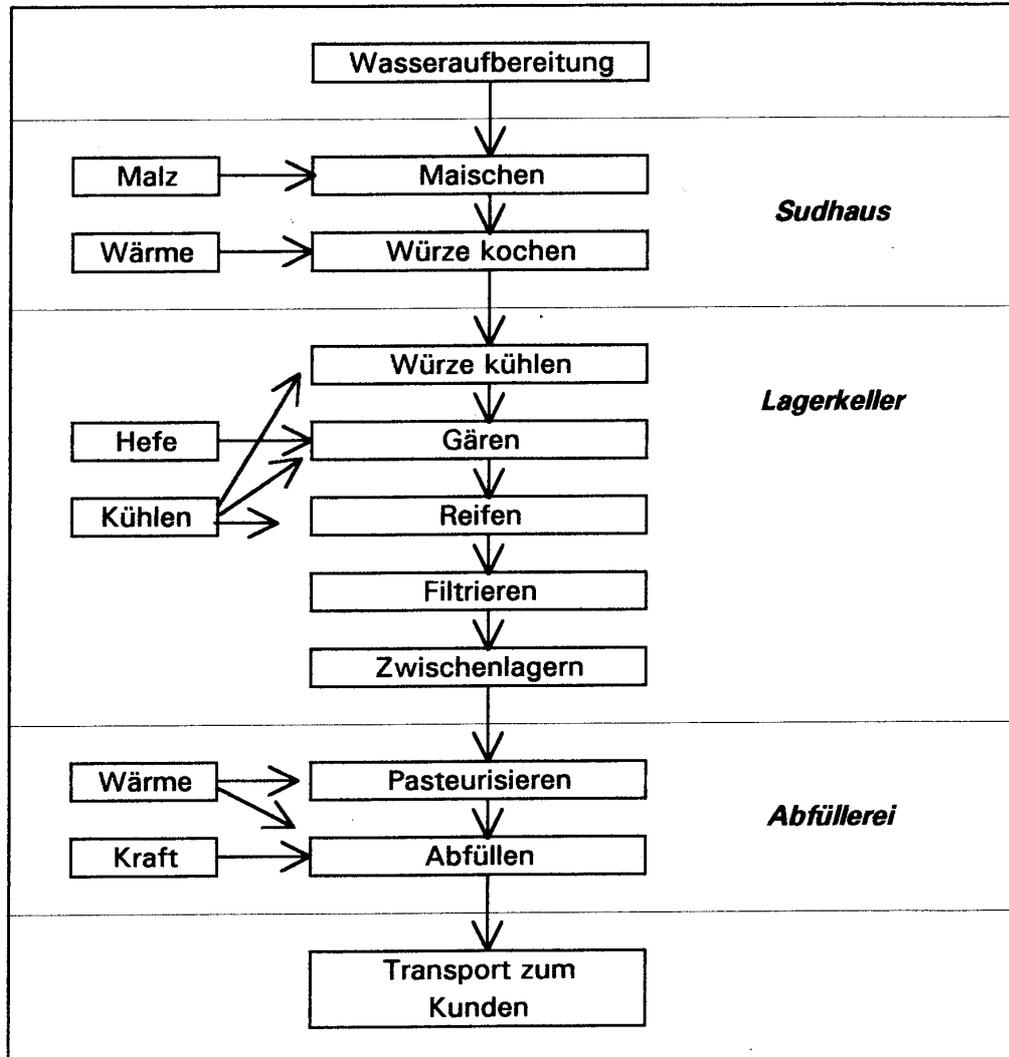
5.1.1 Die Bedeutung der Brauereien für die Schweiz. Volkswirtschaft

In der Schweiz gibt es derzeit (1991) ca. 28 selbständige Brauereiunternehmen, die insgesamt jährlich etwa 4,2 Mio hl Bier erzeugen und verkaufen (zusätzlich werden etwa 0,5 Mio hl importiertes Bier verkauft, der Exportanteil ist gering). Neben Bier stellen einige Brauereien auch alkoholfreie Getränke her, um so ihre Angebotspalette zu diversifizieren. Die grösste Brauerei hat eine Jahresproduktion von ca. 1,2 Mio hl, die kleinsten Brauereien produzieren unter 10'000 hl/a.

Der jährliche Brennstoffverbrauch aller Schweizer Brauereien liegt bei etwa 650 TJ, dies sind etwa 0,8 % des Brennstoffbedarfs der Schweizer Industrie, der jährliche Elektrizitätsbedarf liegt bei ca. 61 GWh, dies sind etwa 0,4 % des Strombedarfs der Schweizer Industrie. Die Energiekosten zur Herstellung von Bier bewegen sich im Rahmen von 3 - 5 % der Gesamtkosten.

5.1.2 Beschreibung des traditionellen Verfahrens zur Bierbereitung

Malz wird mit warmem Wasser eingemaischt (= gemischt) und stufenweise erwärmt. Die unterschiedlichen Malzbestandteile (Treber) werden abgetrennt und die so entstandene Maische wird unter Beigabe von Hopfen in der Würzpfanne gekocht, wobei ca. 10 % der Maische verdampft werden. Die Kochzeit und Temperatur variiert je nach verwendetem Kochsystem. In der Regel beträgt der Zeitbedarf zur Würzbereitung 6 - 8 Stunden. Das Endprodukt des Kochprozesses, die Ausschlagwürze wird auf 5 - 6° C abgekühlt und nach dem Zusetzen von Hefe in Gärtanks vergoren. Hier muss die anfallende Gärwärme abgeführt werden. Nach etwa sieben Tagen ist die Hauptgärung beendet und das sogenannte Jungbier wird in Lagertanks umgepumpt. Die Nachgärung und Reifung in diesen Lagertanks dauert etwa 6 - 8 Wochen. Danach wird das so erhaltene Bier filtriert, eventuell stabilisiert und pasteurisiert und anschliessend abgefüllt und verkauft.



Figur 21: Flussbild der Bierherstellung

5.1.3 Alternative Brauverfahren und -techniken

Aufgrund sich ständig ändernder wirtschaftlicher Rahmenbedingungen und aufgrund des technischen Fortschrittes gibt es zahlreiche Abwandlungen der einzelnen Verfahrensschritte des traditionellen Brauprozesses und verschiedene Technologien, die zum Teil auf den Energieverbrauch einen erheblichen Einfluss haben. So gibt es beispielsweise unterschiedliche Methoden zur Maischebereitung:

- Beim Würzekochen kann der Kochprozess durch Überdruck verkürzt und die Verdampfungszeit erniedrigt werden.
- Die beim Kochprozess entstehenden Brüden (= Wasserdampf) können zur Erwärmung von Brauch- und Brauwasser dienen oder mittels Brüdenkompression kann die Wärme des Wasserdampfes zurückgewonnen und dem Prozess neu zugeführt werden.
- Durch die Verwendung von Spezialtanks mit direkter Kühlung kann der Gär- und Reifungsprozess im selben Tank durchgeführt werden.
- Diese Tanks ermöglichen auch durch spezielle Druck- und Temperatursteuerung einen verkürzten Gär- und Lagerprozess.

5.1.4 Stand des Wissens/vorliegende Arbeiten

Zum Energieverbrauch in Brauereien existieren zahlreiche Untersuchungen, die sich jedoch meist nur mit einzelnen Technologien und deren grundsätzlichen Einsatzmöglichkeiten beschäftigen oder mit der Analyse einzelner Brauereien und deren speziellen Bedingungen. Lediglich eine Arbeit (Dissertation M. Willmann) analysiert verschiedene Brauereien nach dem selben Schema und führt Vergleiche nach eigentlichen Kriterien durch. Durch die Erstellung dieser Arbeit wurde bei den untersuchten Brauereien ein verstärktes Bewusstsein für Energiefragen ausgelöst, indem zahlreiche Mängel und Verbesserungsmöglichkeiten aufgedeckt wurden. Leider wurden im Anschluss an die Arbeit keine weiteren Untersuchungen durchgeführt, so dass neuere Zahlen fehlen, aus denen sich Sparerfolge (durch Behebung einzelner Mängel) ableiten lassen.

In der Literatur finden sich zahlreiche Angaben zu spezifischen Energieverbrauchswerten einzelner Verfahrensschritte der Bierherstellung. Leider ist fast allen Kennzahlen gemeinsam, dass die genaue Abgrenzung der Prozesse, auf welche sie sich beziehen, nicht dargelegt ist, so dass ein Vergleich nur bedingt möglich ist.

Als erste grobe Anhaltswerte liessen sich aus der Literatur die folgenden Kennwerte ableiten:

Prozessschritt		Spezifischer Verbrauch	
		Schweiz 1983	Deutschland 1990
Gesamtbrennstoffverbrauch	kWh/hl VB	35 - 194	10 - 26
Gesamtstromverbrauch	kWh/hl VB	10 - 26	7 - 11
Bereich:			
- Sudhaus Wärmeverbrauch	kWh/hl AW	23 - 60	14 - 31
- Keller Stromverbrauch	kWh/hl VB	3 - 12	
- Abfüllung Wärme	kWh/hl VB	34 - 62	17 - 24
Strom	kWh/hl VB	1 - 2,4	

VB = Verkaufsbier

AW = Ausschlagwürze (98° C)

Tabelle 4: In der Literatur zu findende Angaben zum spezifischen Energieverbrauch von Brauereien. [Willmann, Brauweltbrevier 1991]

5.2 Bildung und Zusammenstellung ab Arbeitsgruppe

Die Betriebsgrößen der Brauereien in der Schweiz sind sehr unterschiedlich. Die jährlich produzierte Menge Bier schwankt um mehr als 1 : 100. Um die Tauglichkeit des Vergleiches zu testen, wurde die Arbeitsgruppe so zusammengestellt, dass in ihr sowohl Vertreter der kleinen, der mittleren als auch der grössten schweizerischen Brauereien integriert waren.

Ferner wurde beim Auswahlverfahren der Branchenverband stark eingebunden, um einerseits die Weiterverbreitung der gewonnenen Erkenntnisse an alle Schweizer Brauereien zu gewährleisten und andererseits die Arbeitsgruppe über die Projektdauer hinaus funktionsfähig zu erhalten. Bei den Brauereien, die durch den Verband vorgeschlagen wurden, wurden zunächst Gespräche mit der Geschäftsleitung geführt und das Projekt eingehend vorgestellt. Von den einzelnen Brauereien wurde sodann ein leitender Mitarbeiter, in der Regel der techn. Betriebsleiter, in die Arbeitsgruppe delegiert. Eine Übersicht über die teilnehmenden Brauereien, ihre jährlich (1990/91) produzierte Biermenge und die Funktion der delegierten Arbeitsgruppenmitglieder zeigt die folgende Tabelle 5:

Brauerei	jährlich produzierte Ausschlagwürze in hl	Funktion des an der Arbeitsgruppe teilnehmenden Vertreters
1	1'400'000	techn. Assistent im zentralen Stab des Konzerns
2	240'000	
3	72'000	
4	8'500	Braumeister, Mitglied der Geschäftsleitung
5	17'000	Eigentümer
6	14'000	Eigentümer, Braumeister ¹⁾
7	52'000	Braumeister, techn. Leiter
8	450'000	techn. Betriebsleiter

1) Vertreter Interessengruppe für kleinere und mittlere Brauereien

Tabelle 5: Jährlich (1990/91) produzierte Biermenge und betriebliche Funktion der Teilnehmer der projektbegleitenden Arbeitsgruppe "Brauereien"

5.3 Formulierung von zwei Zielen einer Energiekennzahl in der Arbeitsgruppe

Nach einer ausführlichen Diskussion über Energiekennzahlen, der Methode zu deren Gewinnung und die heute bekannten Zahlenwerte, wurden zwei Ziele (= Fragestellungen) definiert, die durch entsprechende Energiekennzahlen beantwortet werden sollten.

1) Bewertung des Gesamtenergieeinsatzes

Als erstes sollte der Gesamtenergieeinsatz, unterteilt nach Wärme und Strom, in Relation zur Produktion gesetzt werden, um so einen ersten Vergleich der Brauereien untereinander zu ermöglichen. Die so erhaltenen sehr umfassenden Kennzahlen ermöglichen jeder Brauerei die Effektivität ihres Energieeinsatzes grob zu beurteilen und durch Diskussion mit den anderen Brauereien erste Schwachstellen herauszufinden. Ferner dient eine solche Kennzahl dazu, den Gesamtenergieverbrauch regelmässig zu kontrollieren und gegebenenfalls seine wichtigsten Einflussparameter herauszufinden.

Alle Arbeitsgruppenmitglieder verpflichteten sich, die entsprechenden Energieverbrauchszahlen und Produktionswerte aus den vorhandenen Betriebsstatistiken monatlich zusammenzustellen und für eine Auswertung zur Verfügung zu stellen.

2) Spezielle Kennzahlen zur Bewertung des Strom- und Kälteverbrauchs im Bereich Lagerkeller

Am Beispiel einer Brauerei sollte gezeigt werden, wie es möglich ist, mit geringem Messaufwand den Kältebereich zu analysieren und zu bewerten. Die Kennzahlen sollten dabei so ermittelt werden, dass der Einfluss der verschiedenen Brauverfahren, Technologien und Rahmenbedingungen der einzelnen Brauereien leicht berücksichtigt werden kann. Dadurch werden die Kennzahlen verschiedener Brauereien vergleichbar.

In einem zweiten Schritt sollte dieses Verfahren dann auf alle Arbeitsgruppenmitglieder angewendet werden.

5.4 Bestimmung von Gesamtkennzahlen

Im Hinblick auf die vorgegebenen Ziele (Vergleich der Brauereien untereinander, erstes Erkennen von Einflussfaktoren, Basis für regelmässige Verbrauchskontrolle) und unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen (keine Messungen, nur Auswertung vorhandener Unterlagen und Statistiken) wurde die Systemabgrenzung durchgeführt. Aufgrund dieser konnten die Mess- und Bezugswerte festgelegt werden. Dies führte zu den folgenden Definitionen und Abgrenzungen:

- Es wurde nur der Verbrauch an Energieträgern (Endenergie) betrachtet, die brauereiinterne Umwandlung in andere Energieformen blieb unberücksichtigt.
- Der Einfachheit halber wurden die Energieverbräuche der gesamten Brauereien inklusive aller Hilfs- und Nebenbetriebe erfasst. Lediglich betriebsfremde Energieverbraucher waren nach Möglichkeit auszuklammern. Durch diese Abgrenzung war es möglich, die durch die Brauereien von den Energielieferanten bezogenen Energiemengen zu verwenden.
- Die Energieverbräuche wurden nur nach Elektrizität und Brennstoffen unterteilt. Der Verbrauch an Treibstoff wurde nicht berücksichtigt.
- Als Bezugsgrösse diente die produzierte Menge Ausschlagwürze (98° C) und die Menge abgefülltes Bier und alkoholfreie Getränke (AFG). Diese Grössen unterscheiden sich zum Teil stark, da zwischen Produktion und Verkauf ca. 2 Monate liegen und zwischen AW (98° C) und verkauftem Bier Schwund und Verluste auftreten. Einige Brauereien füllen zudem "Fremdbier" und einige Brauereien produzieren auch beträchtliche Mengen Mineralwasser und Säfte und füllen diese ab.

Energieverbrauchswerte und die Produktionszahlen sollten monatlich erfasst werden.

Die benötigten Daten wurden mit einem Fragebogen erhoben, der an die Brauereien verschickt wurde. In ihm waren die Monatswerte für

- den gesamten Elektrizitätsverbrauch der Brauerei
- den gesamten Brennstoffverbrauch der Brauerei
- die produzierten Ausschlagwürze heiss
- die abgefüllte Menge Getränk

einzutragen. Bereits das Ausfüllen eines derart einfachen Fragebogens war für einige Brauereien problematisch, da nicht überall Verbrauchsstatistiken geführt werden.

Künftig sollten derartige Fragebogen so gestaltet werden, dass

- nur der Zählerstand am Stichtag eingetragen wird
- nur die Original-Einheiten abgefragt werden (m³ Gas, Liter Oel etc.)

Die Berechnung der Verbräuche sollte vom Auswerter mittels PC vorgenommen werden.

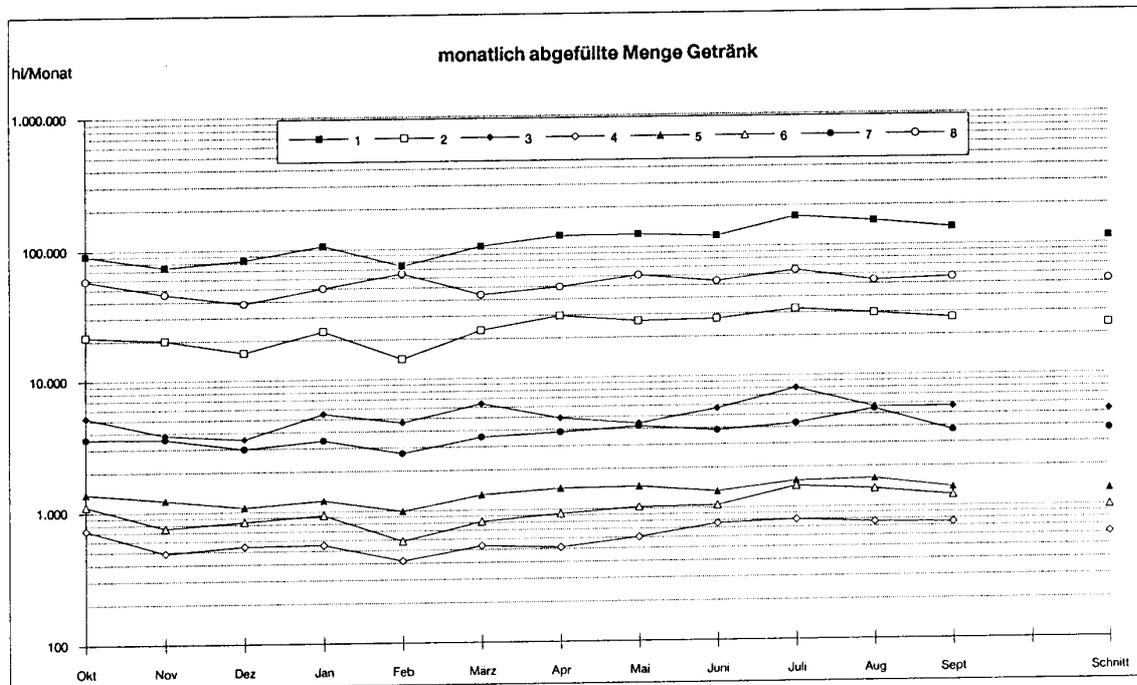
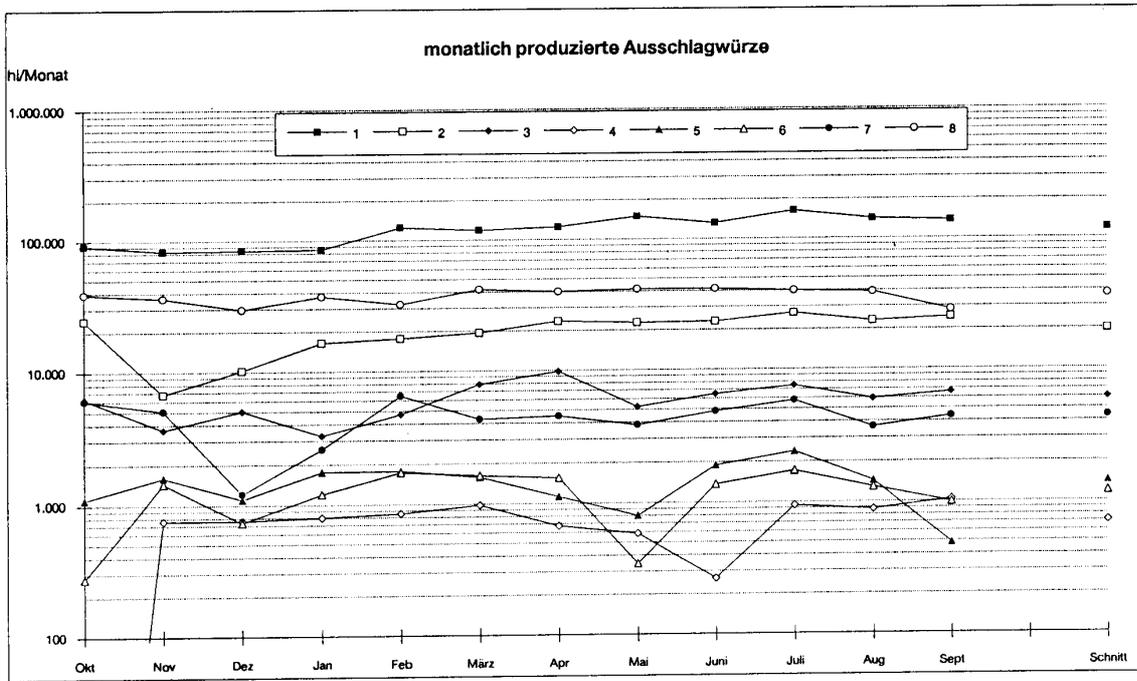
Für jede Brauerei wurde eine Tabelle angelegt (Figur 37), in der monatlich die produzierte Menge Ausschlagwürze (98°C), die abgefüllte Menge Getränke, die für die Brauerei insgesamt verbrauchte Elektrizität und der benötigte Brennstoff (umgerechnet auf Energieeinheiten) eingetragen wurde. Hieraus wurde errechnet:

- die pro hl AW und pro hl abgefülltem Getränk benötigte Menge Elektrizität
- die jeweils benötigte Brennstoffmenge
- der jeweils benötigte Gesamtenergieverbrauch (= Summe aus Elektrizität und Brennstoff).

Brauerei	AW		Elektrizität			Brennstoff			Gesamtenergieverbrauch		
	hl	*abgefüllt hl	kWh	kWh/hl AW	kWh/hlaG	kWh	kWh/hl AW	kWh/hl aG	kWh	kWh/hl AW	kWh/hl aG
Hürlimann 8	hl	hl	kWh	kWh/hl AW	kWh/hlaG	kWh	kWh/hl AW	kWh/hl aG	kWh	kWh/hl AW	kWh/hl aG
Okt	38.855	58.635	767.280	19,7	13,1	1.294.830	33,3	22,1	2.062.110	53,1	35,2
Nov	36.320	45.727	566.140	15,6	12,4	1.376.141	37,9	30,1	1.942.281	53,5	42,5
Dez	29.525	38.365	584.420	19,8	15,2	1.855.548	62,8	48,4	2.439.968	82,6	63,6
Jan	37.251	50.129	502.020	13,5	10,0	1.480.561	39,7	29,5	1.982.581	53,2	39,5
Feb	32.241	64.540	631.360	19,6	9,8	1.496.399	46,4	23,2	2.127.759	66,0	33,0
März	41.720	43.832	643.160	15,4	14,7	1.874.934	44,9	42,8	2.518.094	60,4	57,4
Apr	40.067	49.968	573.540	14,3	11,5	1.216.331	30,4	24,3	1.789.871	44,7	35,8
Mai	41.498	60.349	549.600	13,2	9,1	1.619.361	39,0	26,8	2.168.961	52,3	35,9
Juni	41.414	53.941	810.540	19,6	15,0	1.525.145	36,8	28,3	2.335.685	56,4	43,3
Juli	39.935	64.619	591.040	14,8	9,1	1.405.857	35,2	21,8	1.996.897	50,0	30,9
Aug	38.961	53.339	631.480	16,2	11,8	1.359.932	34,9	25,5	1.991.412	51,1	37,3
Sept	28.183	56.206	683.240	24,2	12,2	1.229.146	43,6	21,9	1.912.386	67,9	34,0
90/91	AW kalt+3%	inkl. AfG	7.533.820	16,9	11,8	17.734.185	39,8	27,7	25.268.005	56,7	39,5

Tabelle 6: "Energienstatistik 90/91 einer RAVEL-Brauerei"

Die Tabellen der einzelnen Brauereien wurden ausgewertet und verknüpft. Die Ergebnisse dieser Auswertungen sind im folgenden zusammengestellt:



Figur 22, 23: "monatlich produzierte Ausschlagwürze" und "monatlich abgefüllte Menge Getränk"

Hier sind die Bezugsgrößen und deren monatliche Veränderungen dargestellt. Auf diese Werte werden die absoluten Energieverbräuche bezogen, um die spezifischen Verbrauchswerte zu bestimmen. Zu beachten ist die logarithmische Darstellung der senkrechten Achse, die bewirkt, dass sogar grosse Produktionsschwankungen sehr geglättet erscheinen. Diese Darstellungsform war erforderlich, da die an der Arbeitsgruppe teilnehmenden Brauereien sich in ihrer Jahresproduktion bis zum Faktor 100 unterscheiden.

Brennstoffverbrauch in kWh/hl Ausschlagwürze

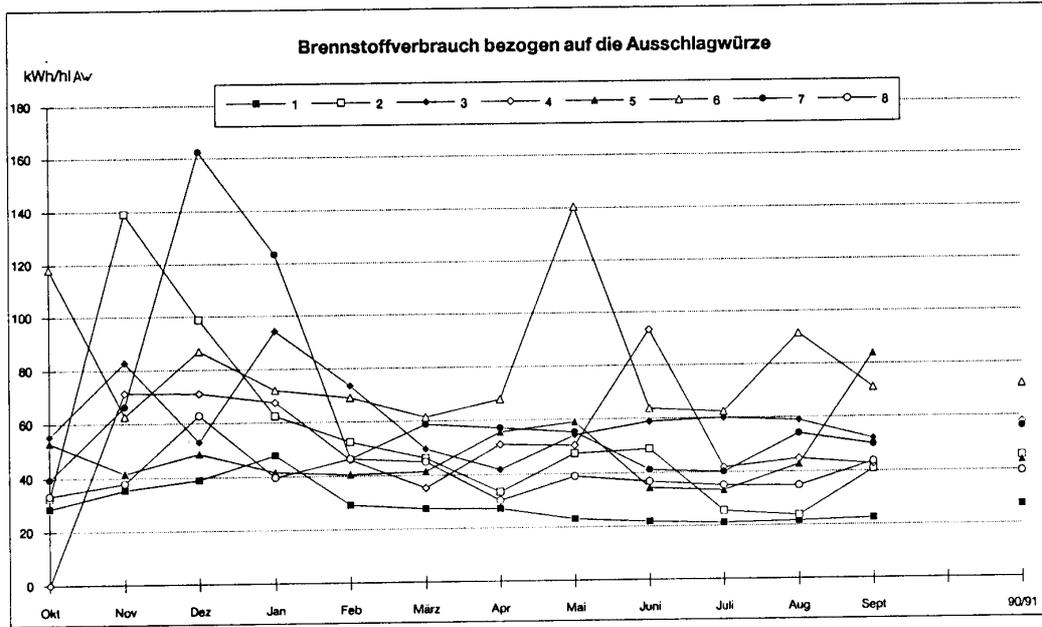
	Brauerei							
Monat	1	2	3	4	5	6	7	8
Okt	29	32	55	0	53	118	39	33
Nov	35	139	83	71	42	63	66	38
Dez	39	99	53	71	49	87	162	63
Jan	48	62	94	68	42	72	123	40
Feb	29	53	73	46	40	69	46	46
März	28	46	50	35	41	61	59	45
Apr	27	34	42	51	56	68	57	30
Mai	23	47	54	50	59	140	55	39
Juni	22	49	59	93	34	64	41	37
Juli	21	26	60	42	33	62	40	35
Aug	22	24	59	45	43	92	54	35
Sept	23	41	52	43	84	71	50	44
90/91	27	45	58	58	44	72	56	40

Brennstoffverbrauch in kWh/hl abgefülltes Bier & AFG

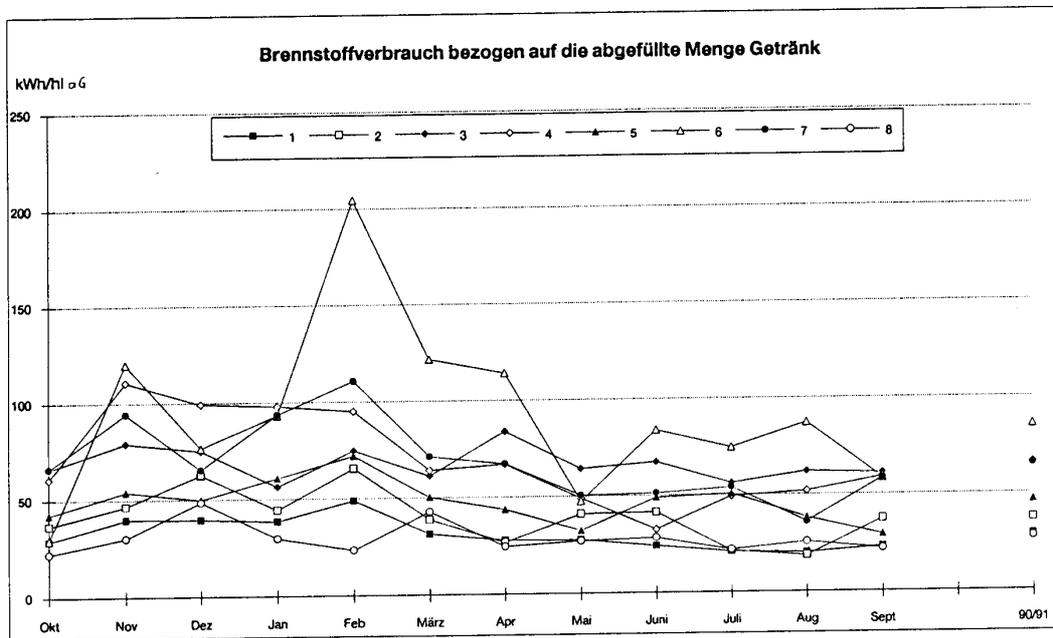
	Brauerei							
Monat	1	2	3	4	5	6	7	8
Okt	29	37	66	61	42	29	66	22
Nov	40	46	79	111	54	120	94	30
Dez	40	63	75	99	50	76	65	48
Jan	38	44	56	98	61	93	93	30
Feb	49	65	75	95	72	204	111	23
März	31	39	61	64	50	122	71	43
Apr	28	27	84	67	43	114	67	24
Mai	27	41	64	49	32	47	50	27
Juni	24	41	67	32	49	84	51	28
Juli	21	21	56	49	51	74	54	22
Aug	20	19	62	52	38	87	36	25
Sept	23	37	61	59	29	58	58	22
90/91	29	37	66	66	47	86	65	28

Tabelle 7: Spezifischer Brennstoffverbrauch verschiedener Schweizer Brauereien

In der Tabelle 7 sind die spezifischen Verbrauchskennzahlen des Brennstoffverbrauchs alle Arbeitsgruppenmitglieder zusammengefasst. Die Tabellen sind in den folgenden Figuren 24, 25 graphisch dargestellt.



Figur 24: Brennstoffverbrauch der RAVEL-Brauereien bezogen auf die produzierte Ausschlagwürze

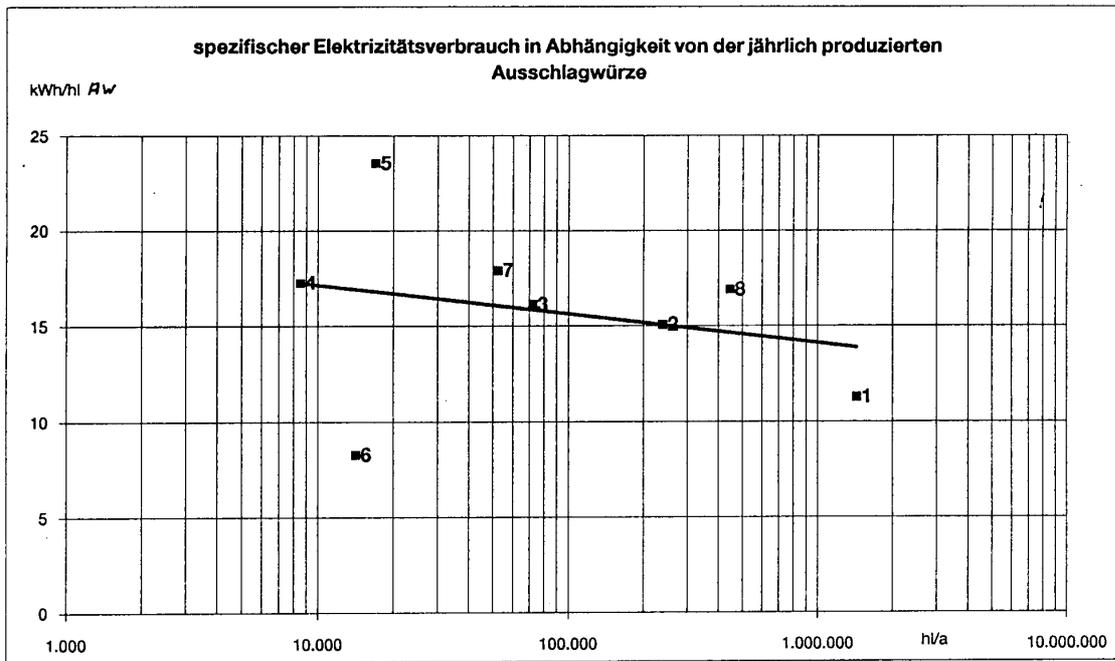


Figur 25: Brennstoffverbrauch der RAVEL-Brauereien bezogen auf die abgefüllte Menge Getränk

Die Figuren zeigen zum einen die grosse Bandbreite der spezifischen Kennzahlen der Brauereien und zum anderen auch z.T. sehr starke Schwankungen der Kennzahlen einzelner Brauereien.

Die Schwankungen der Kennzahlen jeder Brauerei liegen z.T. an den Schwankungen der Bezugsgrösse in den einzelnen Monaten, da der Energieverbrauch nur zu einem (geringen) Teil mit diesen direkt verknüpft ist.

Die Unterschiede zwischen den Kennzahlen der einzelnen Brauereien werden im folgenden auf der Basis der gemittelten Jahresenergiekennzahlen weiter betrachtet. Hierbei wurde in jeder Graphik die sich durch die Punkte ergebende Regressionsgrade eingezeichnet. Ob die Validität der zu grundlegenden Daten dies erlaubt, wurde nicht überprüft.



Figur 26: Spezifischer Elektrizitätsverbrauch in Abhängigkeit von der jährlich produzierten Ausschlagwürze

Die spezifischen Kennwerte schwanken zwischen 8 und 24 kWh/hl AW.

Tendenziell ist eine Abnahme des spezifischen Wertes mit zunehmender Grösse der Brauerei zu erkennen, einzelne Werte weichen jedoch stark vom "Erwartungswert" ab.

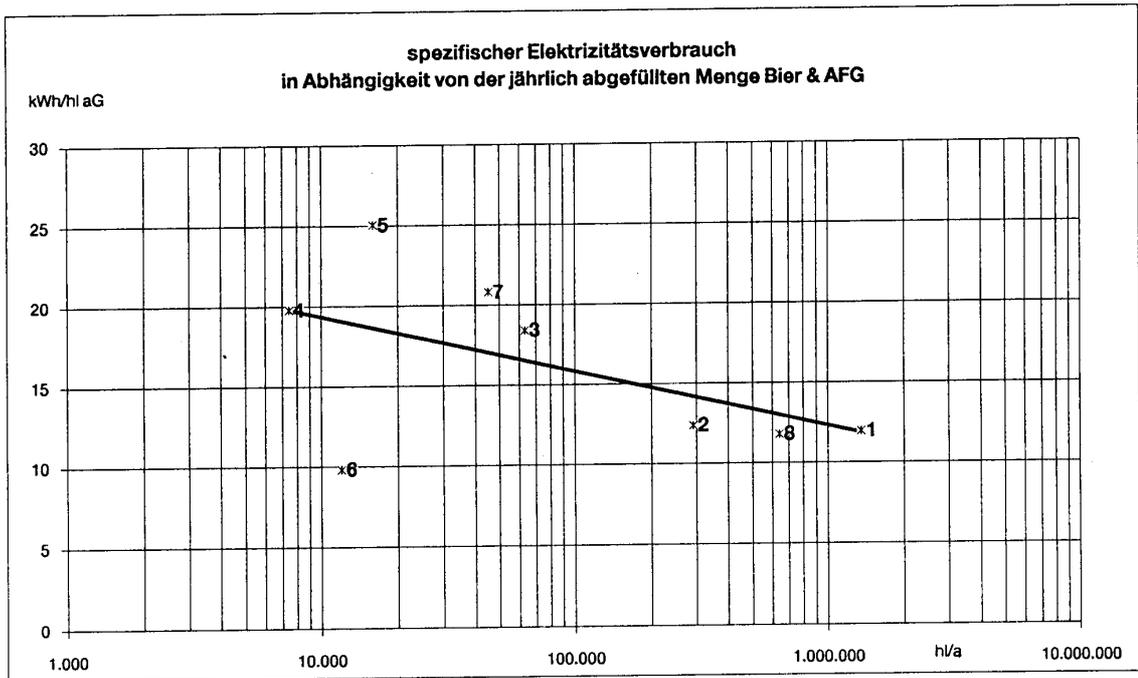
Brauerei 6 hat - trotz ihres geringen Ausstosses den tiefsten Wert. Dies ist zum Teil auf die folgenden Ursachen zurückzuführen.

- die Kältemaschinen sind modern
- die Kondensatoren werden mit 10 °C kühlem Wasser gekühlt
- die Lagerung erfolgt in "natürlich kaltem" Felskeller
- der den Berechnungen zugrunde liegende Stromverbrauch umfasst nur den Verbrauch für die Produktion ohne Verwaltung etc.

Brauerei 1 hat einen sehr günstigen Wert, obwohl diese Brauerei über einen Brüdenverdichter verfügt, der elektrisch betrieben wird. Der günstige spezifische Wert ist wahrscheinlich zum Teil auf die moderne technische Ausstattung dieser Brauerei zylinderkonische Gär- und zylinderkonische Lagertanks und zum anderen Teil auf deren hohe Auslastung zurückzuführen.

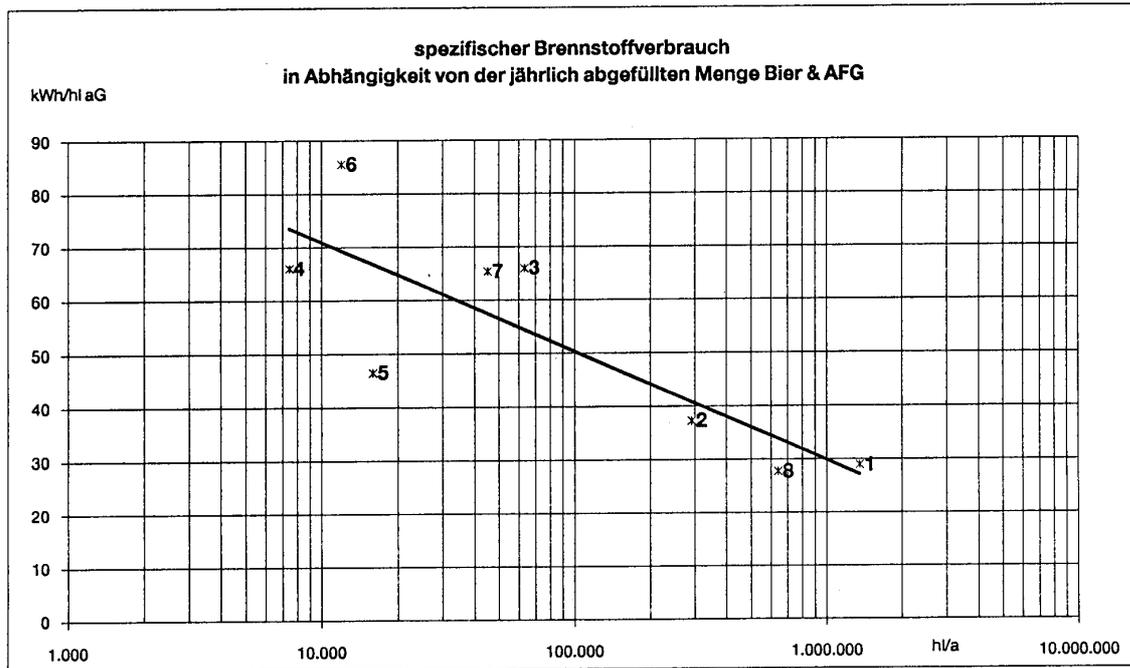
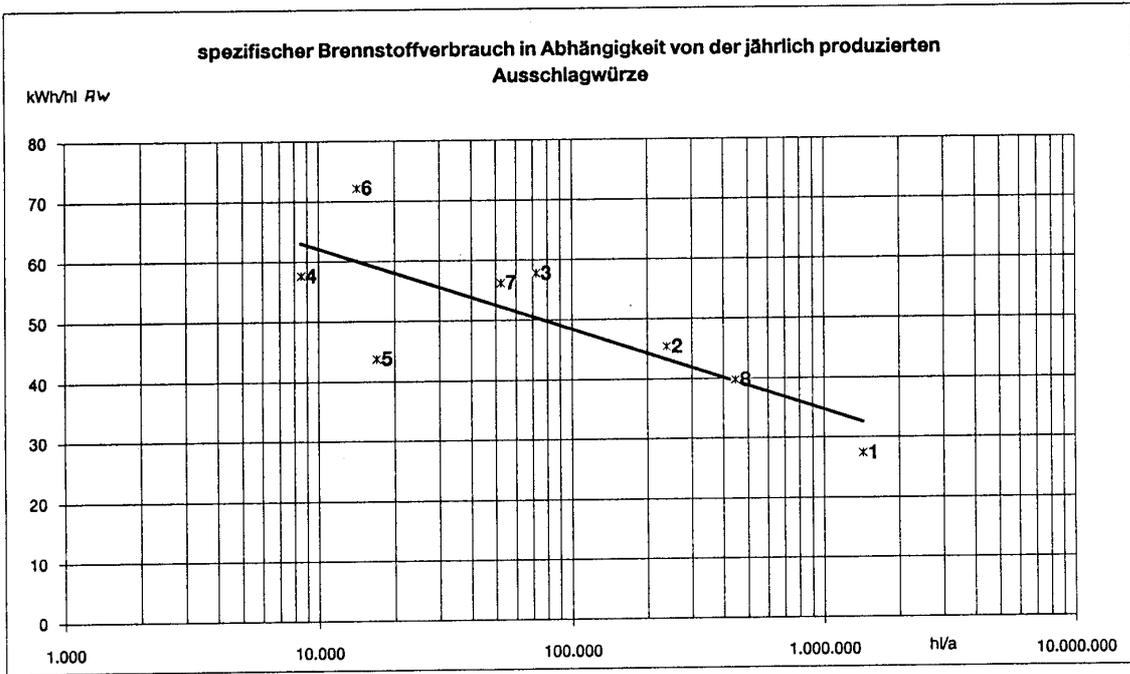
Brauerei 8 liegt vergleichsweise ungünstig, was zum einen auf die ungünstige Kälteerzeugung und den Lagerkeller zurückzuführen ist und zum anderen auf die grosse Menge AFG, die natürlich den Stromverbrauch beeinflusst ohne in der Bezugsgrösse berücksichtigt zu sein.

Brauerei 5 liegt erheblich über dem "Erwartungswert", was auf den Einsatz von Nachtstrom zur Brauwassererwärmung zurückzuführen ist.



Figur 27: Spezifischer Elektrizitätsverbrauch in Abhängigkeit von der jährlich abgefüllten Menge Bier und AFG.

Bei den meisten Brauereien liegen die Kennwerte etwas höher als in der vorigen Grafik, da die abgefüllte Menge Bier geringer ist als die produzierte Ausschlagwürze. Nur bei den Brauereien 2 und 8 liegen die Werte deutlich günstiger, da Brauerei 2 fremderzeugtes Bier und Brauerei 8 grosse Mengen AFG abfüllt.

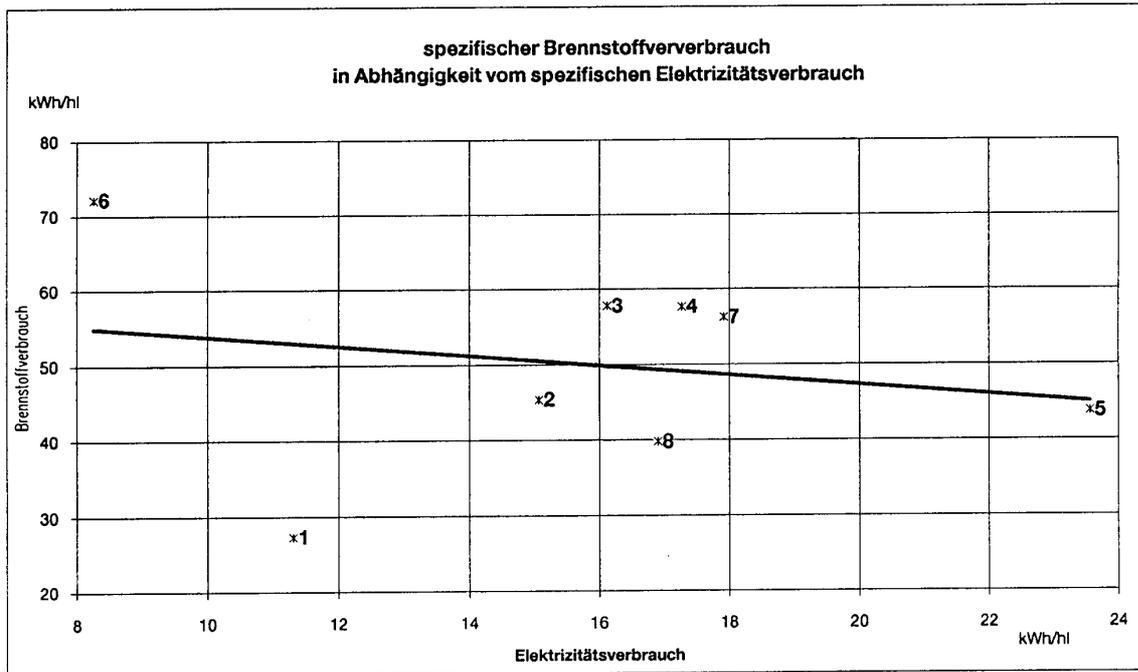


Figur 28, 29: Spezifischer Brennstoffverbrauch in Abhängigkeit von der jährlich produzierten Ausschlagwürze (oben) und der jährlich abgefüllten Menge Getränk (unten)

Hier schwanken die spezifischen Werte zwischen 27 und 72 kWh/hl AW. Am günstigsten liegt die Brauerei 1, was auf die Brüdenverdichtung zurückzuführen sein dürfte. Die Brauerei 8 mit Pfannendunstkondensator hat bereits einen deutlich höheren Kennwert von 40 kWh/hl AW. Der hohe Kennwert von Brauerei 6 ist möglicherweise auf einen Nebenbetrieb zurückzuführen, der mit Wärme versorgt wird.

Bei Brauerei 5 wirkt sich der Elektrizitätseinsatz zur Brauwassererwärmung und die direkte Befeuern der Sudpfannen günstig auf den spezifischen Brennstoffverbrauch aus.

Bezieht man den spezifischen Brennstoffverbrauch auf die abgefüllte Menge Getränk, so verbessern sich die Kennwerte wieder bei Brauerei 2 und 8. Da der Wärmebedarf einer Brauerei aber zum grössten Teil durch das Sudhaus bestimmt wird, ist diese Darstellung weniger aussagekräftig.

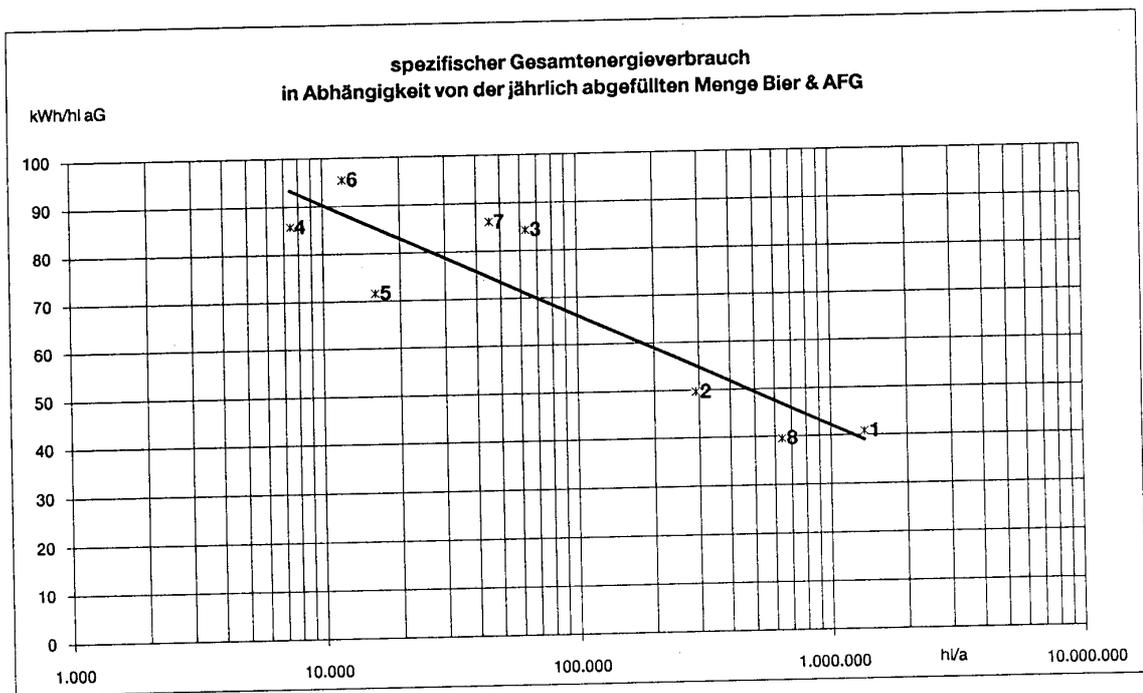
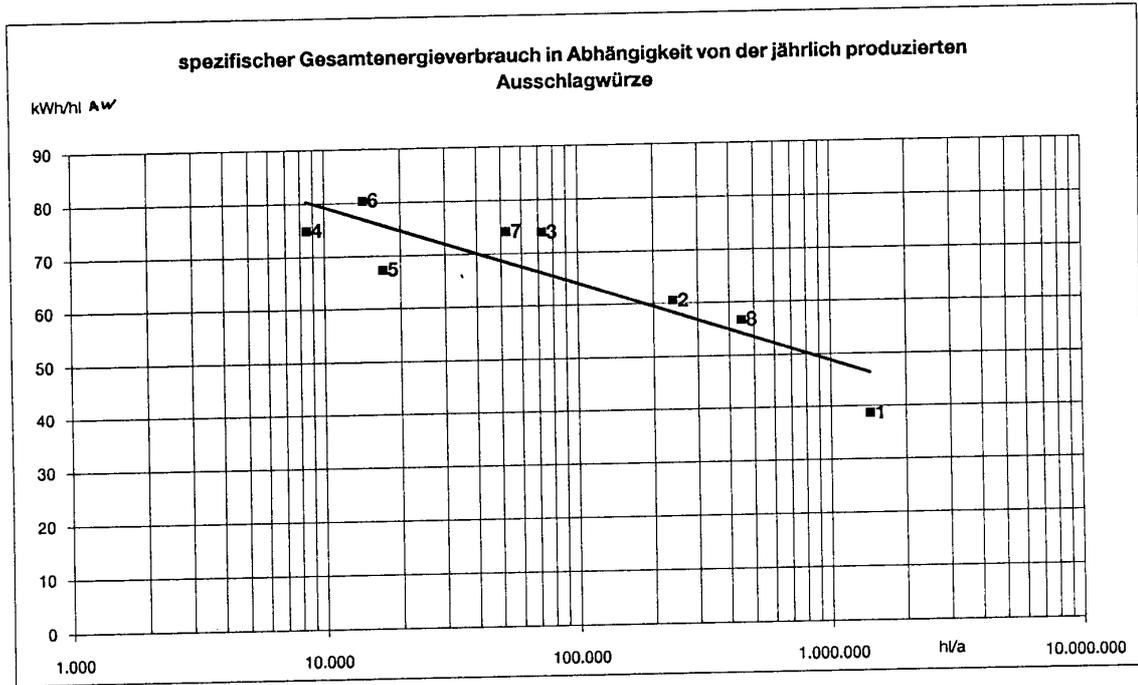


Figur 30: Spezifischer Brennstoffverbrauch in Abhängigkeit vom spezifischen Elektrizitätsverbrauch

Diese Figur soll sichtbar machen, ob zwischen Elektrizität und Brennstoff Substitutionsbeziehungen bestehen. Dies würde bedeuten, dass Brauereien mit einem hohen Brennstoffverbrauch einen tieferen Elektrizitätsverbrauch hätten und umgekehrt.

Eine solche Substitutionsbeziehung scheint allenfalls bei der Brauerei 5 (hoher Elektrizitätsverbrauch bei tiefem Brennstoffverbrauch) und der Brauerei 6 (hoher Brennstoffverbrauch bei kleinem Elektrizitätsverbrauch) zu bestehen. Der hohe Brennstoffverbrauch der Brauerei 6 ist jedoch wahrscheinlich auf einen Nebenbetrieb zurückzuführen. Gut erkennbar ist wieder die günstige Position der Brauerei 1, die sowohl beim Brennstoff als auch beim Strom am günstigsten liegt.

Die Lage der aus den Punkten resultierenden (berechneten) Geraden ist eher zufällig, da diese stark streuen.



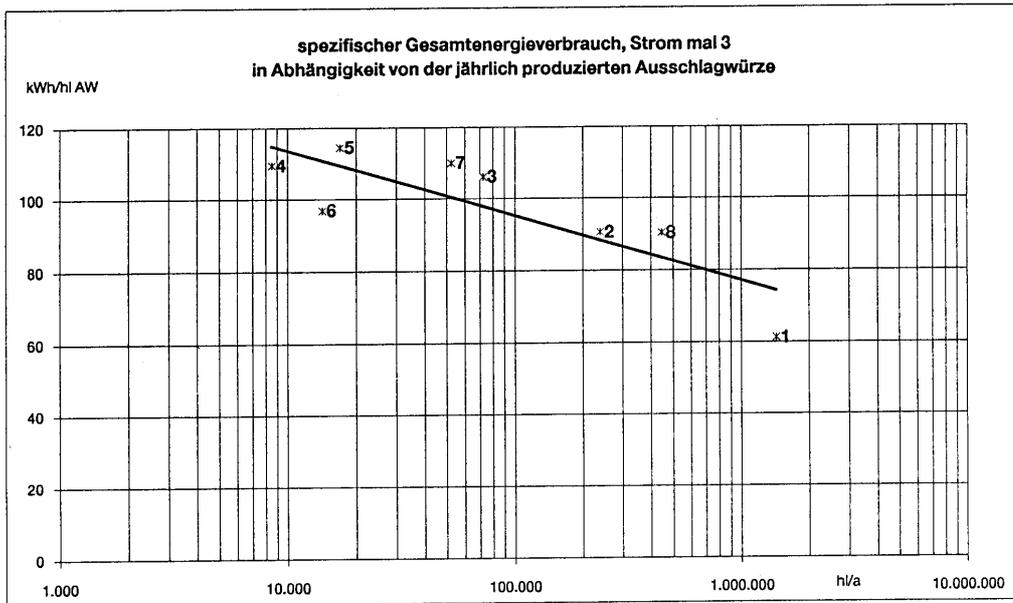
Figur 31, 32: Spezifischer Gesamtenergieverbrauch in Abhängigkeit von der jährlich produzierten Ausschlagwürze (oben) und der jährlich abgefüllten Menge Bier und AFG (unten)

Der auf die AW bezogene Kennwert schwankt zwischen 39 und 80 kWh/hl AW. Auch hier ist die Brauerei 1 mit Abstand am günstigsten. Auf die abgefüllte Menge Getränk bezogen, verbessern sich wieder die Werte der Brauereien 2 und 8.

Die Auswertung des Gesamtenergieverbrauchs unterscheidet sich von der des Brennstoffverbrauchs nur wenig. Da der Brennstoffverbrauch erheblich grösser ist als der Stromverbrauch, ist die Addition beider Grössen nur wenig grösser als der Brennstoffverbrauch selbst.

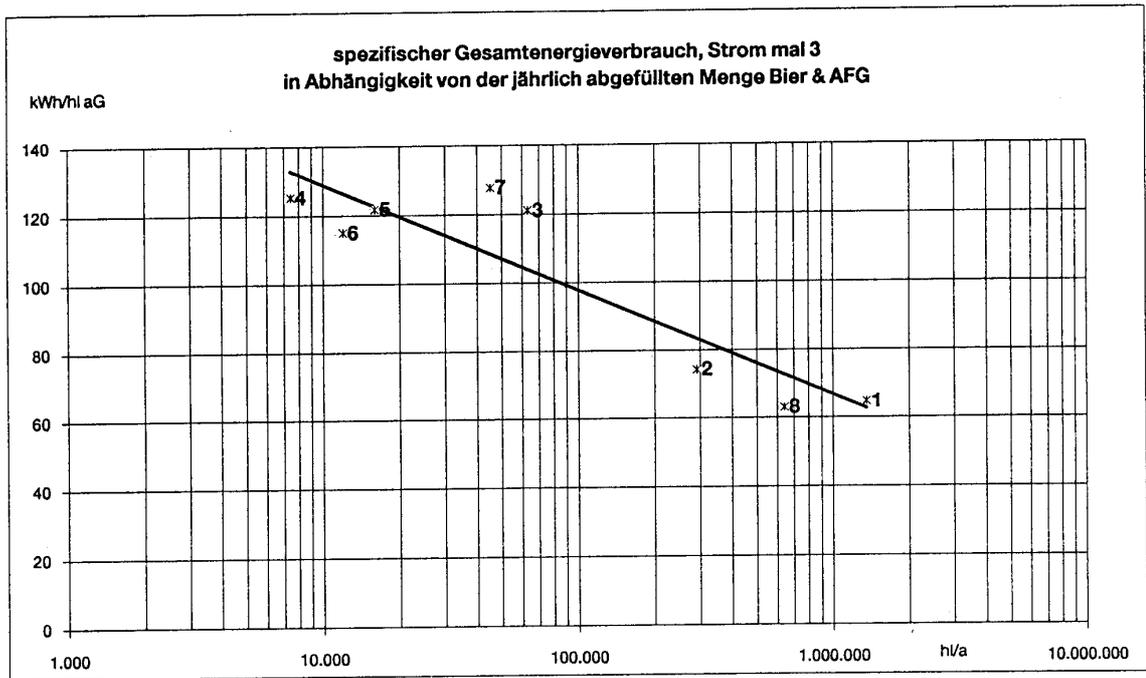
Da der Strom aber energetisch erheblich wertvoller und dementsprechend teurer als Brennstoff ist, wurde in der nächsten Grafik, (Figur 33 und 34) der Strom mit dem Faktor 3 multipliziert und erst dann zum Brennstoffverbrauch dazu addiert.

Brauerei 1 liegt mit einem Kennwert von ca. 60 erheblich günstiger als die anderen Brauereien, die sich zwischen 90 und 120 kWh/hl AW bewegen. Gegenüber dem ungewichteten Gesamtenergieverbrauch verschiebt sich vor allem die Position der Brauerei 5 nach oben und die Brauerei 6 nach unten. Diese Verschiebung spiegelt den relativ hohen bzw. tiefen

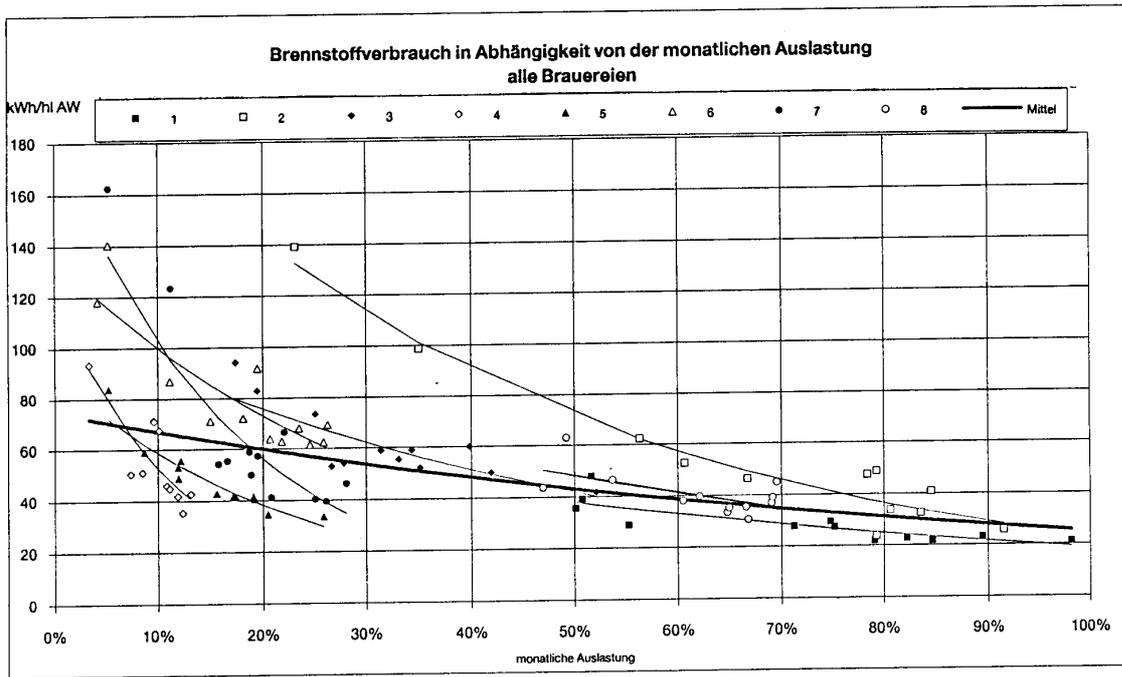
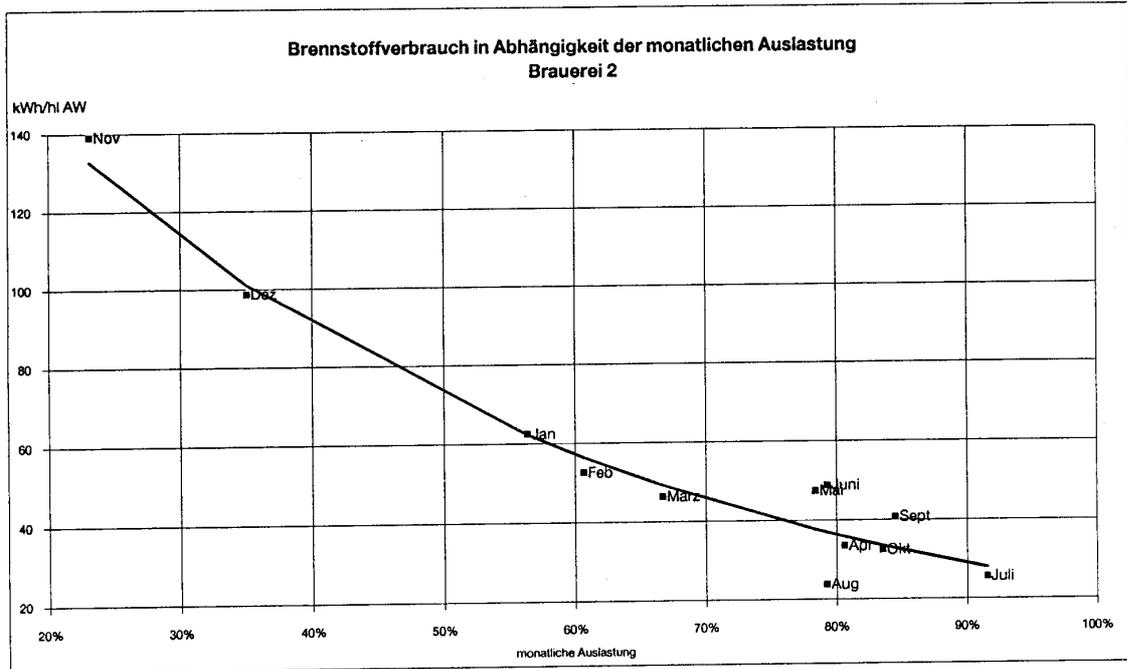


spezifischen Stromverbrauch wieder.

Figur 33: Spezifischer Gesamtenergieverbrauch, Strom mal 3 in Abhängigkeit von der produzierten Ausschlagwürze



Figur 34: Spezifischer Gesamtenergieverbrauch, Strom mal 3 in Abhängigkeit von der abgefüllten Menge Getränk



Figur 35, 36: Brennstoffverbrauch in Abhängigkeit von der monatlichen Auslastung

Die Figuren 35 und 36 zeigen die Abhängigkeit des spezifischen Brennstoffverbrauchs pro hl Anschlagwürze in Abhängigkeit von der monatlichen Auslastung des Sudhauses. Als 100% Auslastung wurde diejenige Menge Ausschlagwürze angenommen, die produziert werden könnte, wenn während 4 Wochen über 5,5 Tage im 3-Schichtbetrieb die volle Kapazität des Sudhauses zur Würzeherstellung (Lager hell) genutzt würde.

Die obere Grafik zeigt die Werte einer Brauerei, die untere Grafik fasst die Werte aller Brauereien zusammen.

In beiden Grafiken wird wieder deutlich, dass bei guten Auslastungen tiefere Kennwerte resultieren. Es sind wiederum die grösseren Brauereien, die die guten Auslastungen und tieferen Kennwerte haben. Es stellt sich damit die Frage, ob die tieferen Kennwerte eher mit der Grösse der Brauerei oder eher mit der relativen Auslastung zusammenhängen. Die Analyse jeder einzelnen Brauerei (dünne Kurven) zeigt, dass die spezifischen Monatswerte bei schlechten Auslastungen erheblich ansteigen, also in erster Linie von der spezifischen Auslastung abhängen und erst in zweiter Linie von der Grösse der Brauerei. Bei einer genaueren Analyse sollte hier nur der Wärmeverbrauch des Sudhauses berücksichtigt werden. Eine wochenweise Analyse würde die Abhängigkeit noch besser veranschaulichen.

Nicht geklärt werden konnte die Frage, warum die Kurven bei den kleineren Brauereien steiler als bei den grossen verlaufen.

5.5 Kennzahlen im Bereich Lagerkeller

Aufgrund des oben beschriebenen Ziels der Analyse (Punkt 5.3) wurde die folgende Systemabgrenzung gewählt:

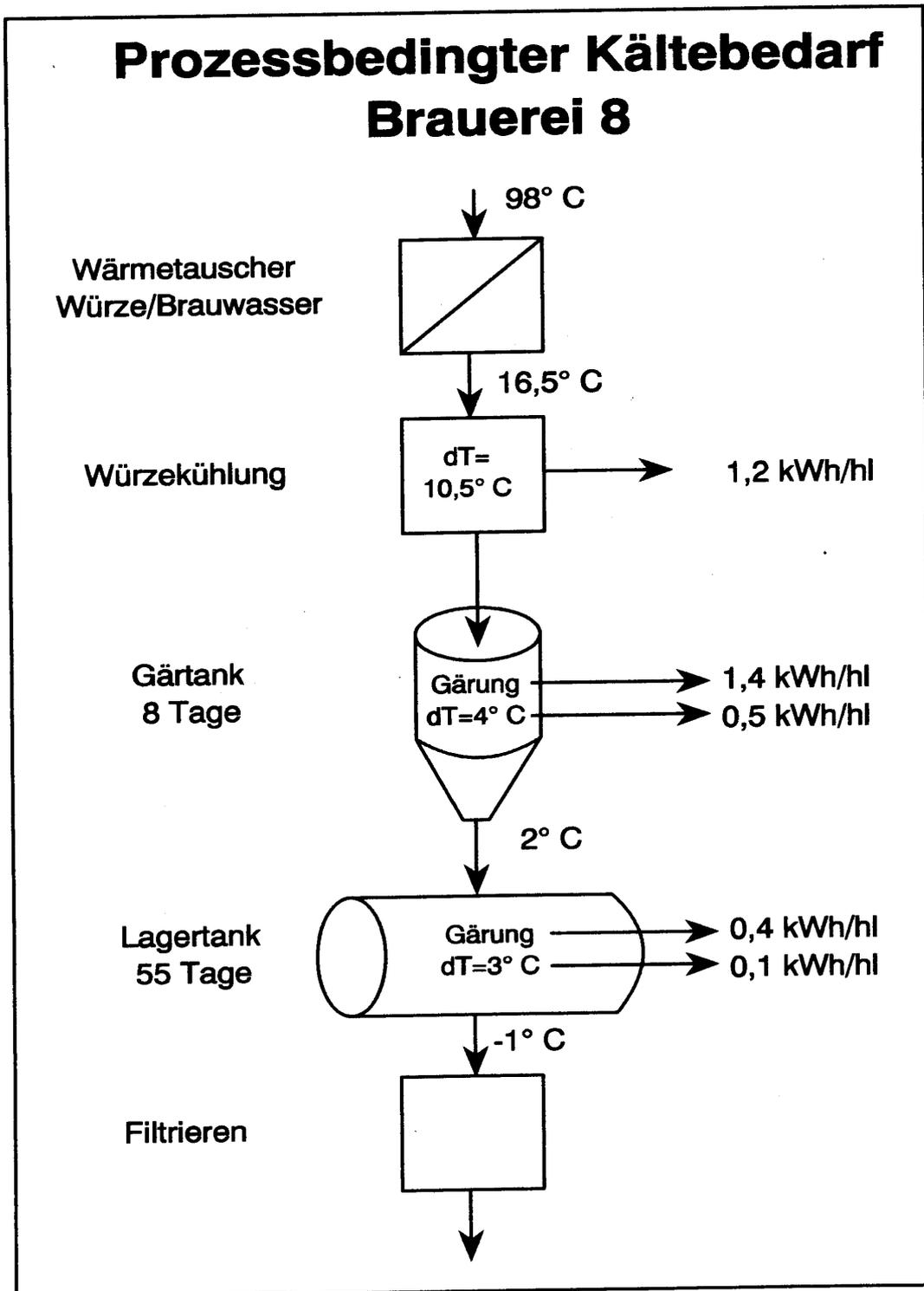
- Der Bereich Lagerkeller beginnt beim Würzekühler-Eingang und endet mit der Filtration des Biers.
- Der Bereich Lagerkeller wurde in die Segmente Wärmetauscher Würze/Brauwasser, Würzekühlung, Gärung, Lagerung und Filtration unterteilt. Die Segmente Würzekühlung, Gärtank und Lager wurden getrennt betrachtet.
- In jedem dieser Segmente wurde nur der Kälteverbrauch analysiert. Dabei wurde unterschieden in prozessbedingten Kältebedarf (durch Abkühlung und Gärwärme) und Verluste.
- Der Elektrizitätsverbrauch zur Erzeugung der Kälte wurde getrennt analysiert und bewertet.
- Als Bezugsgrösse diente die Menge filtriertes Bier. Hiermit wurden alle absoluten Verbrauchswerte in spezifische Kennziffern umgerechnet.

Durch die Aufteilung auf die kälteverbrauchenden Segmente einerseits und die Unterscheidung in prozessbedingten Kältebedarf und Verluste andererseits, erhält man Kennzahlen, die Vergleiche zwischen unterschiedlichen Brauereien ermöglichen.

Das Beispiel Brauerei 8

In Figur 37 sind die wichtigsten Prozessschritte mit den dazugehörigen Temperaturen und dem prozessbedingten Kältebedarf dargestellt. Die Figur auf Seite 74 zeigt ein Übersichtsschema, welches die Kälteerzeugung, die Kälteverteilung und die Kälteverbraucher darstellt. Für die Analyse als sehr vorteilhaft erwies sich:

- Der Verdichter I und die Gewerbekältemaschinen dienen nur zur Kühlung der Lagerkeller. Verdichter II und III decken gemeinsam den restlichen Kältebedarf.
- An allen Kältemaschinen befinden sich Betriebsstundenzähler. Die Laufzeiten der Verdichter I, II und III sind wochenweise erfasst.
- Der (gemeinsame) Stromverbrauch der Verdichter I, II und III ist ebenfalls wochenweise bekannt.
- Die Kondensations- und Verdampfungstemperaturen der Verdichter I, II und III sind im Jahresmittel bekannt.
- Für die Verdichter I, II und III lag ein Diagramm vor, aus dem sich bei bekannter Kondensations- und Verdampfungstemperatur die Kälteleistung ablesen lässt.



Figur 37: Prozessbedingter Kältebedarf der Brauerei 8 (Braujahr 89/90)

Die Seiten 74 bis 77 zeigen die Messgrößen, die Bezugsgrößen, den Rechengang und die sich für das Braujahr 90/91 ergebenden Kennwerte. Die Kennwerte sind jeweils grau unterlegt. Die Veränderung zum Vorjahr ist in den beiden rechten Spalten dargestellt.

Jeder ausgewiesene Kennwert hat seine spezielle Bedeutung, die bei der Interpretation beachtet werden muss.

- Die spezifische Lagerkapazität (Fläche oder Volumen)

Diese beiden Kennzahlen sind ein Mass für die Raum- und Flächenausnutzung der Lagerkeller. Kleine Kennzahlen sind ein Indiz für ungünstige Verhältnisse und können auf die Ursache für einen erhöhten Kältebedarf hindeuten.

- Spezifischer Elektrizitätsbedarf für Bierproduktion und AFG Dieser als einziger auf die abgefüllte Menge Getränke bezogene Kennwert dient lediglich der Orientierung, um die Bedeutung des Stromverbrauchs relativ zum Gesamtverbrauch abschätzen zu können.

- Spezifischer Elektrizitätsbedarf für Bierkühlung

Dieser Wert charakterisiert den gesamten Kältebereich und lässt dessen erste Gesamtbeurteilung zu.

- Gütegrad

Diese Zahl ist der Quotient aus der effektiven Leistungszahl und der CarnotZahl. Die effektive Leistungszahl errechnet sich aus den Laufzeiten, dem gemessenen Stromverbrauch und den Kälteleistungen gemäss Herstellerangaben. Die tatsächlichen Kälteleistungen konnten im Rahmen dieser Studie nicht gemessen werden, so dass die Richtigkeit der effektiven Leistungszahl nicht überprüft werden konnte. Der Gütegrad ist ein Mass zur Beurteilung der gesamten Kälteerzeugungsanlage (Motor und Verdichter) unter Berücksichtigung der betrieblich vorgegebenen Kondensations- und Verdampfungstemperaturen.

- Spezifische Energie für die Würzekühlung

Dieser Wert gibt an, wieviel Kälte-Energie physikalisch benötigt wird, um die Würze, nachdem sie ein Teil der Wärme an das frische Brauwasser abgegeben hat, auf die Gäransfangstemperatur zu kühlen. Die Höhe dieses Wertes hängt von den Betriebsbedingungen (vor allem Frischwassertemperatur) der Brauerei ab.

- Spezifische Kälteenergie für Gärung und Abkühlung

Dieser Wert gibt an, wieviel Gärwärme abgeführt werden muss und wieviel Kälteenergie dem Bier entzogen werden muss, um es auf die richtige Lagereingangstemperatur zu kühlen. Auch dieser Wert ist bei den Brauereien verschieden.

- Spezifische Verluste sonstiger Verbräuche

Aufgrund von Plausibilitätsüberlegungen, Berechnungen, zum Teil auch Messungen, finden sich hier die Verbrauchswerte der "Nebenanlagen", welche bei den einzelnen Brauereien sehr unterschiedlich sein können.

Spezifische Kälteverluste Gärung und Würzekühlung

Aufgrund der Trennung der Kältesysteme war es möglich, die Verluste dieses Bereichs zu berechnen. Sie ergeben sich, indem man von der produzierten Kälte den physikalisch notwendigen Bedarf abzieht. Die Verluste sind ein Mass für die Qualität der Isolationen, der Verteilanlage und der Kältespeicher. Da die Verluste der (neuen) zylinderkonischen Gär-tanks berechnet werden konnten, konnten die Verluste noch weiter eingegrenzt werden.

- Spezifische Kälteenergie für Bierlagerung

Dieser Wert gibt an, wieviel Kälte bei der Lagerung über ca. acht Wochen zur Verlustdeckung, zum Abführen der Gärwär-me aus der Nachgärung und aus der weiteren Abkühlung des Biers benötigt wird. Er beurteilt somit den Bereich "Lage-rung" als Ganzes.

- Spezifische Kälteenergie Gärung und Abkühlung

Dies ist wider die physikalisch notwendige Kälteenergie zum Abführen der Gärwärme und zum Senken der Biertempera-tur.

- Spezifische Kälteenergie zur Verlustdeckung

Die Differenz der beiden oberen Werte ist ein Mass für die energetische Qualität der Kälteverteileinrichtungen und des Dämmstandards der Lagerkeller.

Die Kälteverluste sind auf vier verschiedene Bezugsgrössen bezogen dargestellt, was jeweils einen anderen Aspekt be-leuchtet:

* Bezogen auf die filtrierte Biermenge ist die Kennzahl auf den Output des Prozessschrittes "Reifung" bezogen, ohne die betrieblichen/räumlichen Gegebenheiten zu berücksichtigen, diese jedoch bewertet.

* Bezieht man die Verluste auf die Lagerfläche bzw. das Volumen, erhält man ein Mass für die Dämmqualität des Lagers, ohne die Lagerbewirtschaftung und ohne die Ausnutzung, der Räumlichkeiten zu bewerten.

* Bezieht man die Verluste auf die Lagerkapazität, so bleibt der Aspekt der Bewirtschaftung und Auslastung der Lager un-berücksichtigt. Mit dieser Zahl könnten beispielsweise Brauereien ihren Dämmstandard vergleichen, auch wenn sie ihr Bier unterschiedlich lange lagern.

Die Figur 38, Seite 78 zeigt als Ergebnis der Untersuchung das Energieflussbild "Kälte" der Brauerei. Die spezifischen Energieverbräuche sind auf die Menge filtriertes Bier bezogen.

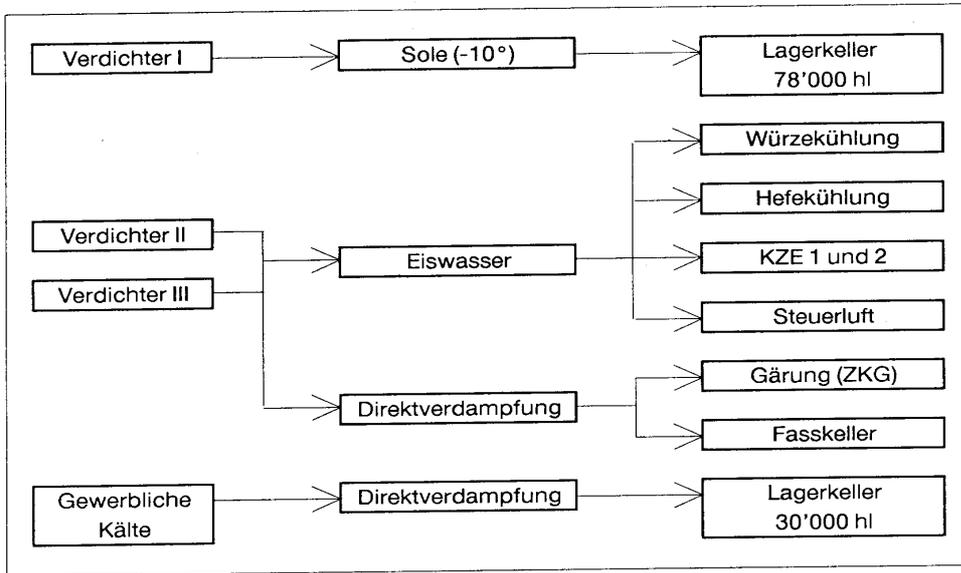
Kennzahlen für die Kälteproduktion in Brauereien

Objekt: Brauerei 8
Verbrauchszahlen: 1990/91

	IST 1990/91	Veränderung zu 89/90	
		abs.	rel.
1. Produktionszahlen			
produzierte Ausschlagwürze (98 °C)	446'000 hl/a	-22'000	-5%
filtrierte Biermenge	436'200 hl/a	-10'800	-2%
abgefüllte Biermenge	411'700 hl/a	-17'300	-4%
Elektrizitätsbedarf für Bierproduktion & AFG	7'208 MWh/a	122	2%
Lagerkapazität gekühlt	107'876 hl		
Lagerkeller Gesamfläche gekühlt	ca. 10'100 m2		
spezifische Lagerkapazität (Fläche)	ca. 11 hl/m2		
Lagerkeller Gesamraumvolumen gekühlt	ca. 35'300 m3		
spezifische Lagerkapazität (Volumen)	ca. 3,1 hl/m3		
Gärkapazität (ZKG)	21'300 hl		
spez. Elektrizitätsbedarf für Bierproduktion & AFG (bezogen auf abgefüllte Biermenge)	17,5 kWh/hl	1	6%

2. Kälteversorgung

2.1 Strukturierung



2.2 Stromverbrauch

Elektrizitätsbedarf Gewerbl. Kälte	ca.	150 MWh/a		
Elektrizitätsbedarf NH ₃ -Kälteanlage (Wel)		1'655 MWh/a	115	7%
gesamter Elektrizitätsbedarf für Bierkühlung		1'805 MWh/a	115	7%
spezifischer Elektrizitätsbedarf für Bierkühlung (bezogen auf filtrierte Biermenge)		4,1 kWh/hl	0,4	9%

2.3 Bestimmung Gütegrad (NH₃-Anlage)

	I	II & III	Mittel			
Verdampfungstemperatur t_o (°C):	-10	-4	-6			
Kondensationstemperatur t_c (°C):	32,5	32,5	32,5			
Leistungszahl nach Carnot: ($E_c = t_o/(t_c-t_o)$)	6,19	7,38	6,94			
produzierte Kälteenergie gemäss Herstellerangaben:						
Verdichter	Regime	Last	Kälteleistung	Betriebszeit	Kälteenergie	Kälteenergie
		(t_o/t_c in °C)	(kW)	(h/a)	(MWh/a)	(MWh/a)
		(%)				
I	-10/32,5	50	131,4	77	10	1 7%
I	-10/32,5	100	264,0	5'452	1'439	66 5%
II	-4/32,5	50	174,4	369	64	-112 -64%
II	-4/32,5	100	349,4	5'001	1'747	1'244 247%
III	-4/32,5	50	174,4	2'603	454	-319 -41%
III	-4/32,5	100	349,4	3'572	1'248	27 2%
Summe Kälteenergie NH ₃ -Anlage (Q_o)					4'963	907 22%
effektive Leistungszahl ($E_e = Q_o/Wel$):			3,00 (kWh/kWh)			0,4 14%
Gütegrad ($G = E_e/E_c$)			0,43			0,1 14%

2.4 Würzekühlung

theroretischer Kältebedarf:				
Wärmekapazität		1,163 Wh/kg*K		
Abkühlung		17 K	6,5	62%
benötigte Kälteenergie für Würzekühlung		862 MWh/a	317	58%
spez.Kälteenergie für Würzekühlung (bezogen auf filtrierte Biermenge)		2,0 kWh/hl	0,8	62%

2.5 Gärung (ZKG)

theroretischer Kältebedarf:				
Wärmekapazität		1,163 Wh/kg*K		
Abkühlung		4 K		
Kälteenergie für Abkühlung		203 MWh/a	-5	-2%
abgebauter Malzextrakt:		3'820 t/a	-40	-1%
anfallende Gärwärme (566 kJ/kg = 157,2 kWh/kg):		601 MWh/a	-6	-1%
Benötigte Kälteenergie für Gärung & Abkühlung		804 MWh/a	-11	-1%
spezifische Kälteenergie für Gärung & Abkühlung (bezogen auf filtrierte Biermenge)		1,8 kWh/hl	0,0	1%

2.6 Sonstige Kälteverbraucher

theroretischer Kältebedarf:

Hefekühlung:

spez. Kältebedarf (bez. auf filtrierte Biermenge)

0,12 kWh/hl

jährlicher Kältebedarf

52 MWh/a

-1 -2%

Kurzzeiterhitzer (KZE)-Kühlung:

spez. Kältebedarf (bez. auf filtrierte Biermenge)

0,6 kWh/hl

jährlicher Kältebedarf

262 MWh/a

-6 -2%

2.7 Bestimmung der Kälteverluste Gärung und Würzekühlung

Kälteproduktion Verdichter II und III

3'514 MWh/a

840 31%

abzüglich: Würzekühlung

862 MWh/a

317 58%

Gärung & Abkühlung

804 MWh/a

-11 -1%

Hefekühlung

52 MWh/a

-1 -2%

KZE-Kühlung

262 MWh/a

-6 -2%

Kälteverluste absolut

1'534 MWh/a

542 55%

spezifische Kälteverluste (bez. auf filtrierte Biermenge)

3,5 kWh/hl

1,3 59%

davon Verluste ZKG ca.

0,2 kWh/hl

2.8 Lagerung

erzeugte Kälte:

Verdichter I ausschliesslich für Lagerung

1'449 MWh/a

67 5%

separate Kühlmaschinen für Lagerkeller 33 bis 37 ca.

450 MWh/a

gesamte Kälteenergie für Lagerung

1'899 MWh/a

67 4%

spez. Kälteenergie für Bierlagerung (eff.)

4,4 kWh/hl

0,3 6%

(bezogen auf filtrierte Biermenge)

Verbrauch für Abkühlung und Restgärung:

Wärmekapazität

1,163 Wh/kg*K

Abkühlung

3 K

Kälteenergie für Abkühlung

152 MWh/a

-4 -2%

abgebauter Malzextrakt:

382 t/a

-4 -1%

anfallende Restgärwärme (566 kJ/kg=157,2 kWh/kg):

60 MWh/a

-1 -1%

benötigte Kälteenergie für Gärung & Abkühlung

212 MWh/a

-4 -2%

spezifische Kälteenergie für Gärung & Abkühlung

0,5 kWh/hl

0,0 0%

(bezogen auf filtrierte Biermenge)

restliche Kälteenergie zur Verlustdeckung:

1'687 MWh/a

71 4%

spezifische Kälteverluste Lagerung:

3,9 kWh/hl

0,3 7%

(bezogen auf filtrierte Biermenge)

spezifische Kälteverluste für Bierlagerung

167 kWh/m²*a

7,06 4%

(bezogen auf Lagerfläche)

spezifische Kälteverluste für Bierlagerung

48 kWh/m³*a

2,02 4%

(bezogen auf Lagervolumen)

spezifische Kälteverluste für Bierlagerung

16 kWh/hl*a

1 4%

(bezogen auf Lagerkapazität)

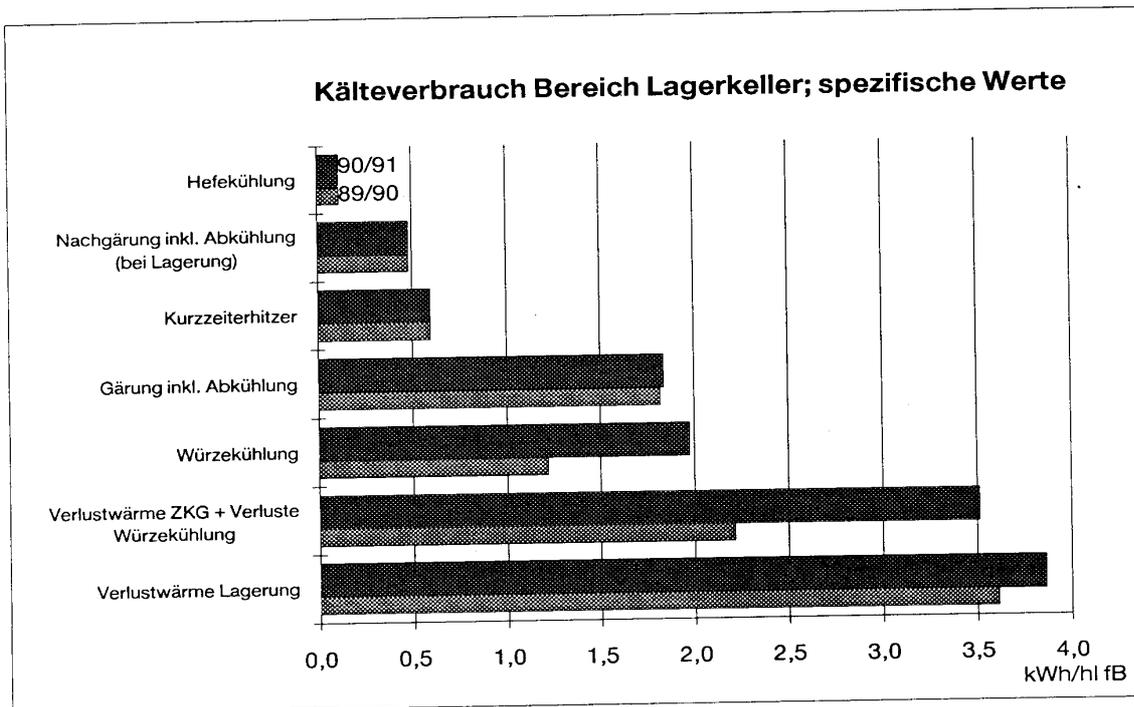
theoretische Abschätzung der Lagerverluste

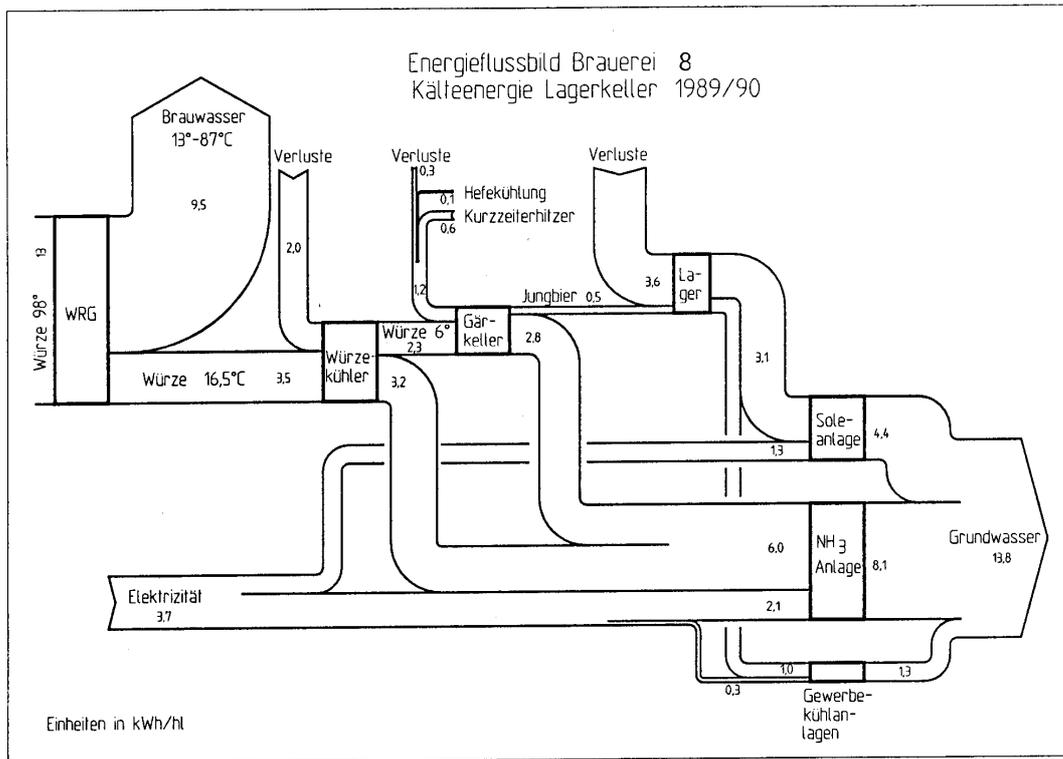
Transmission	800 MWh/a
Lufterneuerung	300 MWh/a
interne Wärmequellen	400 MWh/a
Leitungsverluste	110 MWh/a
gesamte Kälteverluste für Lagerung	1'610 MWh/a

2.9 Bilanz Kälte (Zusammenfassung)

	absolut MWh/a	spezifisch kWh/hl	Aufteilung	Veränderung zu 89/90 kWh/hl	
Würzekühlung	862	2,0	16%	0,8	62%
Gärung inkl. Abkühlung	804	1,8	15%	0,0	1%
Verlustwärme ZKG + Würzekühlung	1534	3,5	28%	1,3	59%
Hefekühlung	52	0,1	1%		
Kurzzeiterhitzer	262	0,6	5%	0,0	0%
Nachgärung inkl. Abkühlung (bei Lagerung)	212	0,5	4%	0,0	0%
Verlustwärme Lagerung	1'687	3,9	31%	0,3	7%
Summe = produzierte Kälteenergie	5'413	12,4	100%	2,3	23%

Die spezifischen Werte sind auf die filtrierte Biermenge bezogen.





Figur 38: Brauerei 8, Flussbild der Kälteenergie im Lagerkeller

5.5.1 Analyse des Kälteverbrauchs "Gärkeller" aller Arbeitsgruppenmitglieder

Vergleich der Brauereien untereinander

Im Anschluss an die Einzelanalyse der Brauerei 8 wurde für alle Brauereien eine analoge Kälteanalyse durchgeführt. Die wichtigsten Schritte hierbei waren:

- Aufteilung des Bereichs Gärkeller in Würzekühlung, Gärung, Lagerung und sonstiger Kälteverbrauch.
- Aufteilung des Kälteverbrauchs in benötigte Kälte = physikalisch notwendige Kälte zur Abkühlung und zum Abführen der Gärwärme- und in Verluste.
- Bewertung des Stromverbrauchs zur Kälteproduktion aufgrund der konkreten Temperaturverhältnisse in jeder Brauerei.

Um die notwendigen Rechengrößen zu erhalten, wurde an jede Brauerei ein Fragebogen verschickt. Aufgrund fehlender Messstellen konnten aber z.T. nicht alle Werte eingetragen werden. Fehlende Werte wurden z.T. geschätzt oder aus anderen Größen berechnet. Die eingetragenen Werte wurden nur auf ihre Plausibilität,

nicht jedoch auf ihre Richtigkeit hin überprüft, somit können die vorgestellten Ergebnisse Fehler enthalten. Vor wichtigen betrieblichen Entscheidungen sollten alle Werte verifiziert werden. Für die Brauerei 3 und 6 lagen keine bzw. für eine Auswertung unzureichende Daten vor.

Folgende Grössen wurden durch den Fragebogen erhoben:

- filtrierte Menge Bier
- Elektrizitätsbedarf gesamte Brauerei
- Malzverbrauch
- Lager- und Gärkapazität
- Ein- und Austrittstemperatur Würzekühler
- Ein- und Austrittstemperatur Gärkeller
- Ein- und Austrittstemperatur Lagerkeller
- Auflistung sonstige Kälteverbraucher
- Typ Kälteerzeugung
- Kälteverteilschema
- elektrische Leistungsaufnahme der Kälteerzeuger
- Kälteleistung der Kälteerzeuger
- Laufzeiten der Verdichter Teil- und Vollast
- Jahresmitteltemperatur des Kühlmediums
- Jahresmitteltemperatur Kondensationstemperatur
- Herstellerdiagramm: Kälteleistung über der elektrischen Leistungsaufnahme in Abhängigkeit von der Kondensations- und Verdampfungstemperatur

Aus diesen Eingangsgrössen wurde analog zu dem auf den Seiten 74 bis 77 beschriebenen Rechengang für jede Braue-

Brauerei		90/91 1	90/91 2	90/91 4	90/91 5	90/91 7	90/91 8	89/90 8a
filtrierte Menge Bier	hl	1'328'990	209'362	7'591	16'019	46'500	436'200	447'000
spz. Gesamtstromverbrauch	kWh/hl	12,2	17,2	19,0	25,0	20,2	16,5	15,9
spz. Stromverbr. Kälte	kWh/hl	2,3	4,8	6,1	8,6	12,6	4,1	3,8
spz. Kälteproduktion	kWh/hl	7,6	18,8	21,1	23,3	32,8	12,4	10,1
spz. Verbrauch für Würzekühlung	kWh/hl	2,1	1,4	1,5	1,2	1,0	2,0	1,2
Bereich Gären	kWh/hl	1,8	2,0	1,8	1,5	1,6	1,8	1,8
Bereich Lagern	kWh/hl	0,8	0,6	0,7	0,5	0,8	0,5	0,5
sonstige Verbraucher	kWh/hl	0,1	0,4	0,2	0,2	0,3	0,7	0,7
technisch benötigte Kälte	kWh/hl	4,8	4,4	4,2	3,4	3,8	5,0	4,2
eff. Leistungszahl		3,3	4,0	3,4	2,7	2,6	3,0	2,7
Verluste im Bereich								
- Würzekühlung und Gärung	kWh/hl			4,8	4,8		3,5	2,2
- Lager	kWh/hl			12,0	15,0		3,9	3,6
spz. Gesamtkälteverluste	kWh/hl	2,8	14,4	16,8	19,8	29,0	7,4	5,8
Lagerumschlagsdauer	Jahre	0,17	0,25	0,43	0,40	0,37	0,25	0,25
spz. Gärlagerumschlag	Jahre	0,04	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05

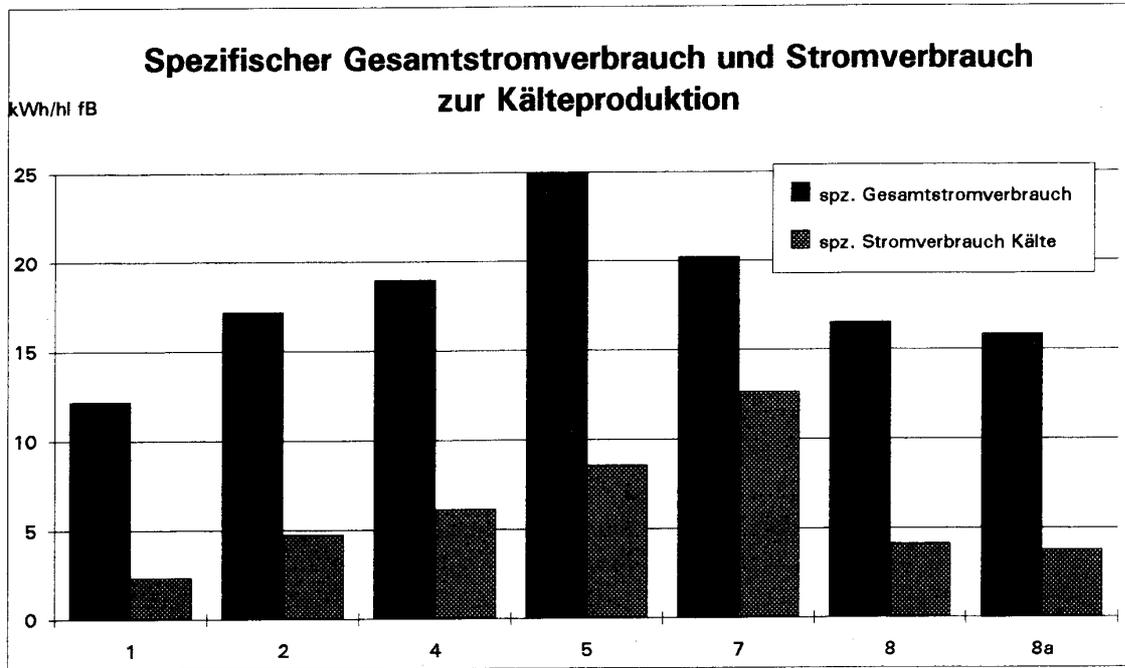
alle spz. Werte sind auf die filtrierte Menge Bier bezogen

rei die entsprechenden Kennwerte berechnet.

Tabelle 8: Vergleich der Kälteauswertungen aller Brauereien

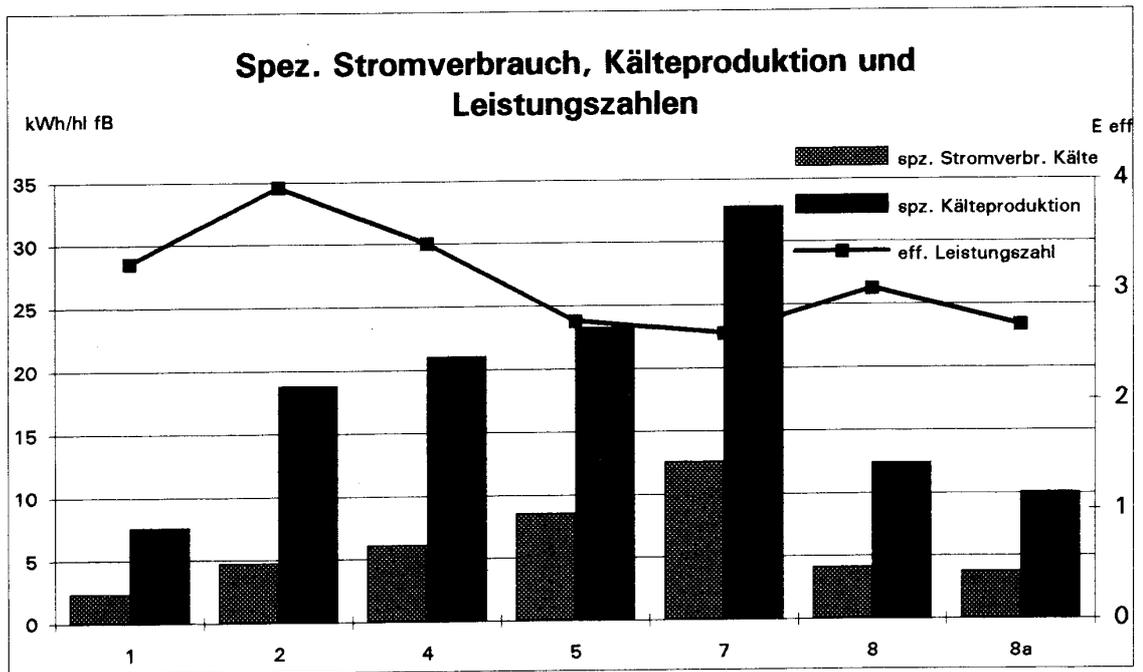
Die Tabelle 8 gibt einen Überblick über die wichtigsten Kennzahlen der einzelnen Brauereien. Alle spezifischen Werte sind auf die filtrierte Menge Bier (fB) bezogen. Für die Brauerei 8 lagen die Werte für das Braujahr 90/91 und 89/90 vor. Die folgenden Grafiken sind eine visuelle Auswertung dieser Tabelle.

Interpretation der Ergebnisse



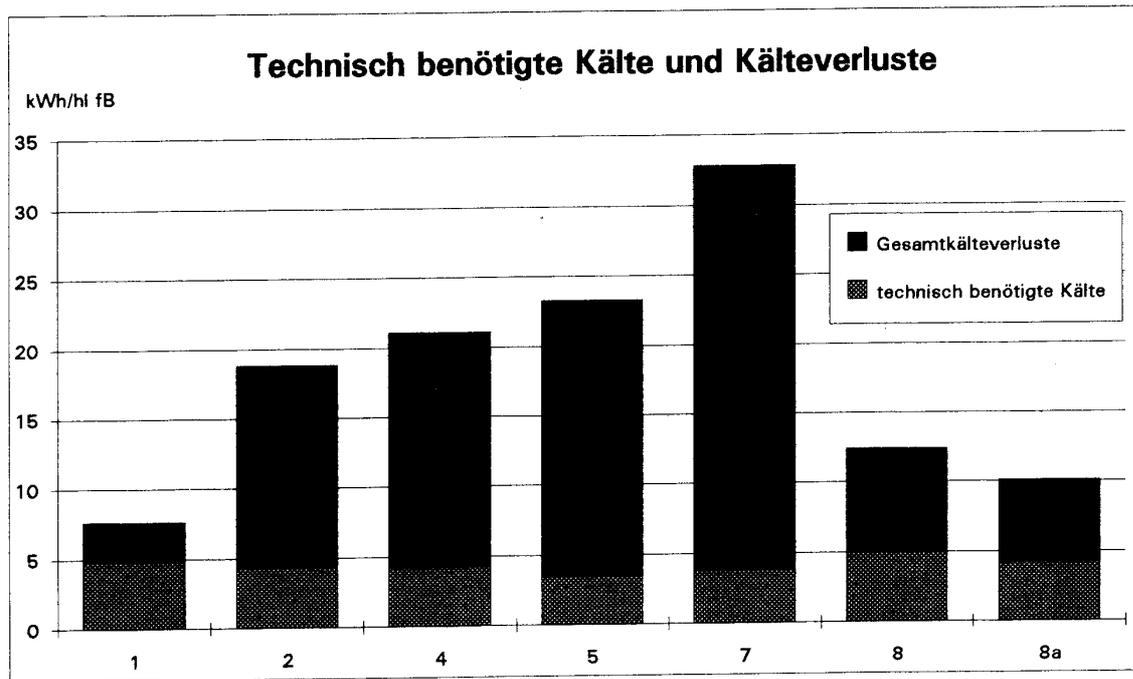
Figur 39: Spezifischer Gesamtstromverbrauch und spezifischer Stromverbrauch Kälte

Der spezifische Gesamtstromverbrauch der Brauereien schwankt zwischen 12 und 25 kWh/hl fB. Den tiefsten Wert hat die Brauerei 1 und den höchsten die Brauerei 5. Der spezifische Stromverbrauch zur Kälteerzeugung (nur Antrieb der Verdichter) schwankt zwischen 2,3 und 10,6 kWh/hl fB, wobei wieder Brauerei 1 den günstigsten, jedoch Brauerei 7 den schlechtesten Wert hat. Brauerei 1 benötigt 19 % ihres Stromes für die Kälteerzeugung, Brauerei 7 jedoch 62 %!



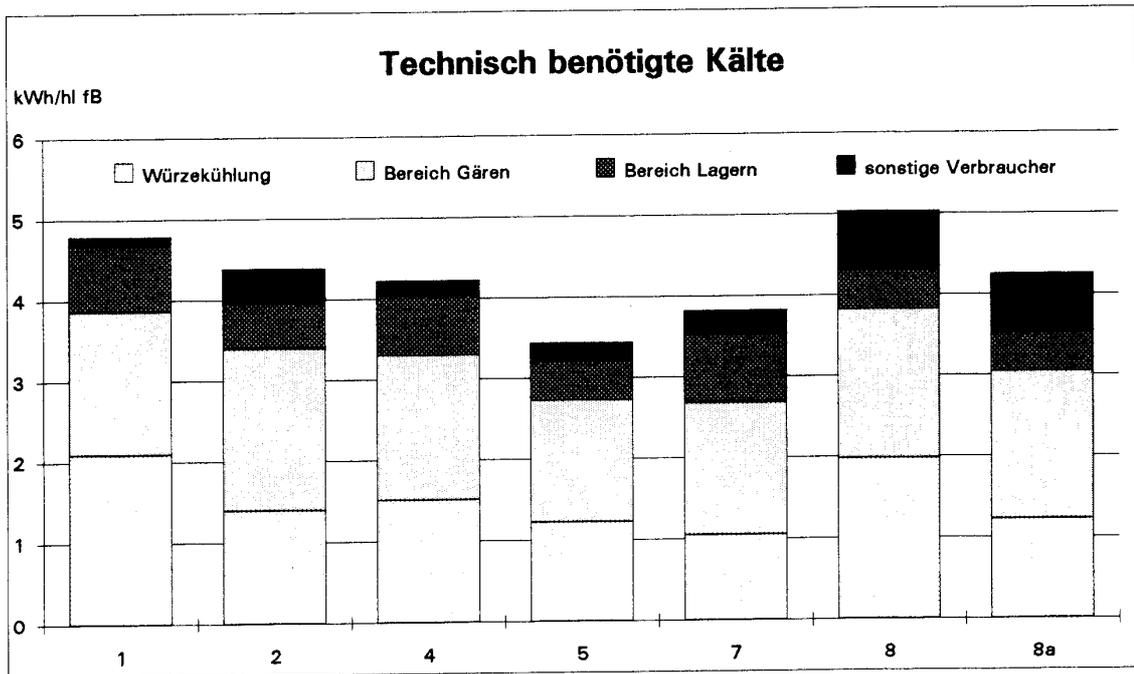
Figur 40: Spezifischer Stromverbrauch Kälte, spezifische Kälteproduktion und effektive Leistungszahl (Eeff)

Die effektive Leistungszahl gibt an, wieviel Einheiten Kälte aus einer Einheit Strom produziert wurden. Sie wird durch die Verdampfungstemperatur, die Kondensationstemperatur und die Kennlinie (bzw. den Betriebspunkt) der Kompressoren bestimmt. Die Kennzahlen schwanken zwischen 2,6 und 4,0. Der tiefe Wert der Brauerei 7 deutet auf sehr ungünstige Verhältnisse, erklärt jedoch nur zum Teil den hohen Stromverbrauch. Die produzierte Kältemenge der Brauereien schwankt zwischen 7,6 (Brauerei 1) und 32,8 kWh/hl fB (Brauerei 7).



Figur 41: Benötigte Kälte und Gesamtkälteverluste

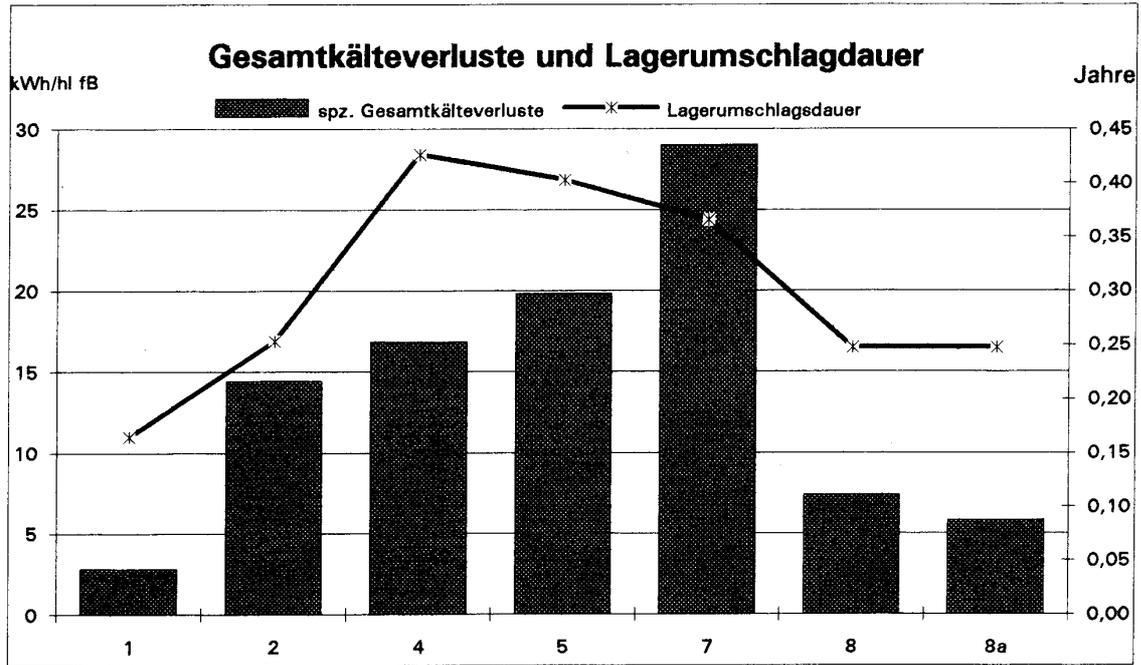
Die Gesamthöhe der Säulen entspricht wieder der gesamthaft erzeugten Kälte. Diese ist aufgeteilt in physikalisch notwendige Kälte für den Abkühlungsprozess und zum Abführen der Gärwärme und in den Rest (= Verlust). Die benötigte Kälte liegt bei allen Brauereien bei oder unter 5 kWh/hlfB, die Verluste schwanken jedoch zwischen 2,8 und 29 kWh/hlfB. Bei der Brauerei 1 sind ca. 37 % der produzierten Kälte Verluste, bei der Brauerei 7 sind es 88 %.



Figur 42: Technisch benötigte Kälte

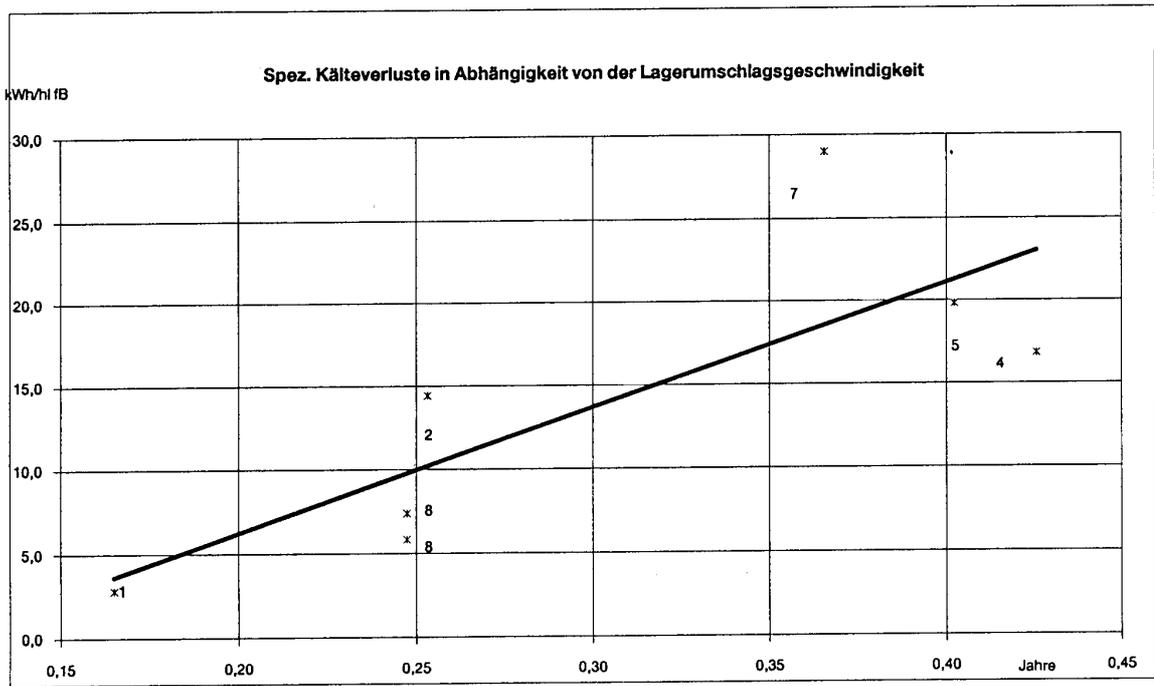
Diese Grafik zeigt die technisch (theoretisch) benötigte Kälte der einzelnen Bereiche. Der Gesamtwert schwankt zwischen 3,4 und 5,0 kWh/hl fB. Im Bereich Gären und Lager sind alle Brauereien etwa gleich, da hier der Bedarf hauptsächlich durch die frei werdende Gärwärme bestimmt wird. Der Bereich Würzekühlung schwankt zwischen 1 und 2 kWh/hl fB und wird im wesentlichen durch Temperatur des neuen Brauwassers bestimmt. Interessant ist der Sprung bei Brauerei 8. Hier wurde eine Umstellung der Würzekühlung von kaltem Stadtwasser auf warmes Tiefenwasser vorgenommen (siehe auch Tabelle Seite 77).

Die Verbrauchswerte der sonstigen Verbraucher wurden nur grob geschätzt und bedürfen im Einzelfall einer Überprüfung. Relativ zum übrigen Verbrauch sind sie jedoch eher klein und beeinflussen das Ergebnis nur unwesentlich.



Figur 43: Gesamtkälteverluste und spezifischer Lagerumschlag

Die Gesamtkälteverluste sind als Balken aufgetragen. Die darüber liegende Kurve zeigt den spezifischen Lagerumschlag. Dieser ist der Quotient aus Lagerkapazität geteilt durch die jährlich gefilterte Biermenge. Ein Wert von 0,25 bedeutet, dass in 0,25 Jahren das gesamte Lagervolumen einmal umgeschlagen wurde. Den höchsten Lagerumschlag hat die Brauerei 1 mit ca. 0,17, den geringsten die Brauerei 4 mit 0,43 Jahren. Auffallend ist, dass die Brauereien mit einem geringen Lagerumschlag auch einen hohen Kälteverbrauch haben. Dies ist offensichtlich die einzige Ursache, bei den Brauereien 2 und 7 liegen die Kälteverbrauchswerte überproportional hoch. Dies wird auch in Figur 44 deutlich. Hier sind die spezifischen Kälteverluste in Abhängigkeit vom spezifischen Lagerumschlag aufgetragen.



Figur 44: Spezifische Kälteverluste in Abhängigkeit vom spezifischen Lagerumschlag

5.6 Umsetzung der Erkenntnisse in der Arbeitsgruppe

Die Bildung und Interpretation der Kennzahlen für die gesamte Brauerei (Gesamtkennzahl) und die detaillierte Analyse des Kältebereichs im Rahmen des RAVEL-Programmes haben bei allen Brauereien eine intensive Diskussion über den rationalen Energieeinsatz ausgelöst. Diese mündeten zum Teil bereits in konkrete Massnahmenpläne, deren Verwirklichung jetzt folgen soll. Die wichtigsten Erkenntnisse und die daraus abgeleiteten Massnahmen für jede Brauerei sind kurz zusammengefasst:

Brauerei 8:

Kennzahlen für die Kälteproduktion

Die durchgeführte Analyse der Kälteanlage hat die der Brauerei bekannten Mängel bestätigt und verdeutlicht. Aufgrund der Analyse im Rahmen des RAVEL-Programmes wurde die Herstellerfirma der Kältegeräte beauftragt, ein Gesamtkonzept zur rationelleren Erzeugung der Kälte auszuarbeiten.

Hauptsächliche Mängel:

Zu hohe Kondensationstemperaturen

- schlechte einstufige Nutzung des Kühlwassers von 13 °C
- zu kleiner Kondensator

Hohe Spitzenbezüge

- hoher Spitzenbedarf durch Direktverdampfung (ZKG)
- Bypassregelung und Teillastbetrieb der Kältekompressoren

Kältekompressoren

- die Leistungsabstufung ist für den heutigen Betrieb zu gross was eine Bypassregulierung bedingt
- nachträgliche Schadraumvergrösserung zur Kompensation der Kompressorenbelastung
- Einfache Schützensteuerung

Eiswasseranlage

- grosse Verteil- und Abstrahlungsverluste, Rührwerke und Pumpverluste
- ständige Zirkulation
- Fehlmanipulationen
- schlechte Isolationen von Tanks und Leitungen
- Verluste beim Eisaufbau

Soleanlage

- grosse Verluste bei der Kühlung der alten Lagertankanlagen
- grosse Verteil- und Abstrahlungsverluste, Rührwerke und Pumpenverluste
- ständige Zirkulation
- Fehlmanipulationen
- schlechte Isolation von Leitungen
- grosse Verluste beim Abtauen
- grosse Umformverluste (NH# 3- Sole-Luft-Tank-Bier)

Mögliche Massnahmen zur Verbesserung der Kälteerzeugung und Kälteübertragung Lagerkeller

- Neubau eines Lagerkellers (zylinderkonischer Lagertank) mit Direktverdampfung
- 4° C anstatt - 10° C
- Ausserbetriebsetzung der Soleanlage

Gärkeller

- Verminderung des Kälte-Spitzenbedarfes durch organisatorische Massnahmen und Veränderung der Temperaturführung
- Isolation der Hefetanks und Nachrüstung mit Temperaturreglern

Würzekühlung

- Umstellung von Eiswasserkühlung auf vorgekühltes Brauwasser

Kälteanlage

- Mehrstufige Kondensation zur besseren Nutzung des Kühlwassers
- Elimination der Schraumvergrößerung bei den Kältekompressoren durch Senkung der Kondensationstemperatur
- Umbau eines Kompressors auf zur Verbesserung des Wirkungsgrades
- Installation eines vierten Kompressors zur Verbesserung der Verfügbarkeit
- Umbau der Steuerung auf SPS zur Verbesserung der Leistungsregulierung

Brauerei 1, 2 und 3

In diesen drei Brauereien führte die Bildung und Interpretation der Kennzahlen zu einer Verbesserung des Ressourcenmanagements, welches auch auf die Mineralwasser-Betriebe angewendet wird. Das bereits vorher vorhandene Kennzahlssystem wurde aufgrund des Projektes ausgeweitet und verfeinert. In Zukunft ist eine quartalsweise Auswertung der Daten aller dem Konzern angehörenden Brauereien und Getränkebetriebe geplant. In Zukunft werden jährlich die Kennzahlen und die sich daraus ergebenden Konsequenzen diskutiert.

Brauerei 4

Die beschränkten personellen und finanziellen Ressourcen und die hohen Überkapazitäten sind für eine kleine Brauerei die grössten Hemmnisse für den rationellen Energieeinsatz. Durch die Bildung der Kennzahlen sind zahlreiche Schwachstellen aufgedeckt worden. Diese wurden zuvor bereits "erahnt", konnten jedoch quantitativ nicht ermittelt werden. Nun kennt man die wichtigsten Energieflüsse und deren Bestimmungsfaktoren und kann gezielt Massnahmen einleiten. Als erstes soll der Stapelkeller nicht mehr gekühlt werden und für ca. 8-9 Monate im Jahr ein Teil der Lager stillgelegt werden.

Brauerei 7

Auch die Brauerei 7 leidet unter grossen Überkapazitäten, die neben hohen Kapitalkosten auch hohe spezifische Energieverbräuche nach sich ziehen. Der Bereich Kälte ist in den vergangenen Jahren vernachlässigt worden, da er aufgrund sehr günstiger Stromtarife trotz des hohen Stromverbrauchs kostenmässig nicht stark ins Gewicht fiel. Da die Strompreise aber in Zukunft beträchtlich angehoben werden, besteht vor allem bei der Sanierung des gesamten Kältebereichs ein grosser Nachholbedarf. Vor allem die folgenden Mängel müssen in Zukunft behoben werden:

Das Kältesystem ist 3-fach verschachtelt. Es ist unübersichtlich und kompliziert und führt zu grossen Umwandlungsverlusten.

- Die Kälteerzeugung ist alt und hat eine unbefriedigende Regelung (Bypass).
- Die Kondensatoren sind unterdimensioniert und genügen bei Volllast nicht. Zum Teil sind sie verkalkt.
- Die Wege der Kälteleitungen sind sehr lang und die Leitungen sind zum Teil schlecht isoliert.
- Die Keller sind überdimensioniert und zum Teil ungenügend isoliert.
- Die Stangeneisproduktion soll aufgehoben werden.
- Die Kühlung des Vollgutes soll in Zukunft entfallen.
- Die Kälteverluste im Bereich Lager sind zum Teil auf organisatorische Mängel zurückzuführen.

Brauerei 5

Die alten Lagertanks sind z.T. 60-jährig und bis zu 7m in den Boden eingegraben. Diese Lagerräume sind nicht isoliert.

Fortbestand der Arbeitsgruppe

Die Arbeitsgruppe wird auch nach Beendigung des RAVEL-Projektes bestehen bleiben und sich regelmässig (1 - 2 mal pro Jahr) treffen.

Die Treffen sollen jedesmal bei einem anderen Arbeitsgruppenmitglied stattfinden, welches dann auch für die organisatorische Betreuung zuständig ist. Die Arbeitsgruppe soll auch für weitere, interessierte Brauereien geöffnet werden, wobei diese sich verpflichten müssen, ihre Verbrauchswerte und Produktionszahlen in der gleichen Weise offenzulegen wie die bisherige Arbeitsgruppenmitglieder.

5.7 Folgerungen

Die Analyse des Bereichs Gärkeller ergab, dass bei der Brauerei 7 die spezifischen Verbräuche an Strom, die produzierte Kälte und vor allem die Kälteverluste sehr hoch lagen. Verglichen mit der Brauerei 8 lagen beispielsweise die Kälteverluste um den Faktor 4 höher (Figur 41). Betrachtet man jedoch die Energiekennzahl Strom der gesamten Brauereien (Figur 39 und Figur 26), so ist der Kennwert der Brauerei 7 nur um den Faktor 1,2 höher als derjenige der Brauerei 8.

Bei der Bildung von Gesamtkennzahlen können sich offensichtlich positive und negative Abweichungen einzelner Teilprozesse kompensieren, so dass die Gesamtkennzahl eine ähnliche energetische Effizienz beider Brauereien vortäuscht (dass beide Brauereien sich hinsichtlich ihrer Stromeffizienz doch unterscheiden, wird bereits in Figur 27 deutlich, bei welcher der Elektrizitätsverbrauch auf die abgefüllte Menge Getränk bezogen ist).

Beim Vergleich von verschiedenen Betrieben mittels Kennzahlen sollte daher aus ähnlichen Kennzahlen nicht geschlossen werden, dass diese Betriebe in allen Teilbereichen energetisch gleich effizient sind. In Teilbereichen können sich diese Betriebe durchaus stark unterscheiden, so dass sich eine detailliertere Analyse und der Vergleich einzelner Teilbereiche bzw. Teilprozesse durchaus lohnen würde.

Literaturverzeichnis

Allgemeine Literatur
Literatur Kunststoffspritzgiessen
Literatur Bierherstellung

Allgemeine Literatur

- 1) ARENA
Energienachfrage in der Metall- und Maschinenindustrie, EGES Arbeitsdokument Nr. 7, Zürich 1987
- 2) Borch G. / Fürböck M. / Mansfeld L. / Winje D. Energiemanagement
Springer Verlag Berlin 1986
- 3) Bundesamt für Energiewirtschaft Schweizerische Elektrizitätsstatistik 1989, Bern 1990
- 4) Bundesamt für Energiewirtschaft Schweizerische Gesamtenergiestatistik 1989, Bern 1990
- 5) Bundesamt für Statistik, Abt. Volkswirtschaft Produktionskonto Schweiz 1985,
Bern 1985
- 6) Bundesamt für Statistik Arbeitsstätten und Beschäftigte nach Wirtschaftsarten, Bern 1986
- 7) Bundesamt für Statistik Statistisches Jahrbuch Schweiz 1991
- 8) Dreyer, H., Sauer, W. Prozessanalyse, Berlin 1982
- 9) Ebersbach, K. F. et. al.
Energieanalyse im mittelständischen Unternehmen, Teil I/II Landesgewerbeamt Baden-Württemberg
Stuttgart 1990

- 10) Expertengruppe Energieszenarien
Möglichkeiten, Voraussetzungen und Konsequenzen eines Ausstiegs der Schweiz aus der Kernenergie, Hauptbericht, Bern Febr. 1988
- 11) Expertengruppe Energieszenarien
Möglichkeiten, Voraussetzungen und Konsequenzen eines Ausstiegs der Schweiz aus der Kernenergie, Beilage 1: Ergänzungen zu den Energieszenarien, Bern Febr. 1988
- 12) Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie (IPT)
Bericht des Teilprojekts F 4 des Sonderforschungsbereichs 144 "Methoden zur Energie- und Rohstoffeinsparung für ausgewählte Fertigungsprozesse", Aachen
- 13) Funk, M.
Industrielle Energieversorgung als betriebswirtschaftliches Planungsproblem (Physika Schriften zur Betriebswirtschaftslehre 32), Heidelberg 1990
- 14) Gruber E. / Brand M.
Rationelle Energienutzung in der mittelständischen Wirtschaft
Verlag TÜV Rheinland Köln 1990
- 15) Huser, A., Minder, R. (EWI)
Messungen als Basis von Stromverbrauchsanalysen
Bulletin SEV/VSE 81 (1990) 22, 24. Nov.
- 16) Konjunkturforschungsstelle der ETH Zürich
Erstellung einer Input-/Output-Tabelle 1980 mit besonderer Berücksichtigung energiewirtschaftlicher Aspekte, EGES Arbeitsdokument Nr. 8, Zürich 1987
- 17) Planconsult, Delta Energie, Arena
Der Energieverbrauch in den Industriezweigen Chemie, Metall und Maschinen, EGES, Schriftenreihe Nr. 2, Bern 1987
- 18) Prognos AG
Die Bedeutung von Strompreiserhöhungen für die stromintensiven Branchen, Schriftenreihe EGES, Nr. 7, Basel 1987
- 19) RWE Essen
Energiebedarfsanalysen - Versorgungskonzepte, Schlüssel zum sinnvollen und sparsamen Energieeinsatz
Essen 1984

- 20) Schäfer, H.
Kumulierter Energieverbrauch von Produkten - Methoden der Ermittlung Probleme der Bewertung,
Brennstoff-Wärme-Kraft 34 (1982) Nr. 7, Juli
- 21) Schmitt, D. / Heck, H.
Handbuch Energie
Verlag Günther Neske Pfullingen 1990
- 22) Schweizerischer Energiekonsumentenverband
Energieverbrauch in der Schweizer Industrie im Jahre 1989,
Basel 1990
- 23) Spreng, Daniel
Energiesparpotentiale in Industriebetrieben,
Zürich, März 1986
- 24) Spreng, Daniel
Wieviel Energie braucht die Energie?
Verlag Fachvereine Zürich, Zürich 1989
- 25) Wohinz J.W. / Moor, M.
Betriebliches Energiemanagement
Springer Verlag Wien 1989

Literatur Bierherstellung

- 26) Brauerei Hürlimann AG
Technischer Energiejahresbericht 1989/90,
Zürich 1991
- 27) Ehrhorn, Th., Carow, W.
Integrierte Energieversorgung und externe Abwärmeverwertung in Brauereien, Forschungsbericht T 83-244 des Bundesministeriums für Forschung und Technologie, Berlin 1983
- 28) Fischer, Johannes
Neue Einsatzmöglichkeiten für Blockheizkraftwerke (BHKW) in der Brauerei, München 1988
- 29) Ganter, E., Plesch, F., Unterstein, K.
Primärenergiesparen in Brauereien,
Technische Rundschau Sulzer 4/1990
- 30) Hug, H., Pfenniger, H.
Brauversuche mit Infusions- und Dekoktions-Maisch-Verfahren
(ohne Ort und Datum)
- 31) Hug, H., Anderegg, P., Pfenniger, H.
Grosstechnische Brauversuche mit variabler Gesamtverdampfung
beim Würzekochen
Poster No. 8, EBC Congress 1983
- 32) Hug, H., Pfenniger, H.
Grosstechnische Brauversuche mit variabler Gesamtverdampfung beim Würzekochen mit und ohne Ueberdruck
Brauerei-Rundschau 94, Nr. 11 (Nov. 1983)
- 33) Hug, H., Pfenniger, H.
Folgen der Aluminium-Ausstattung von Flaschen
Brauerei-Rundschau 100, Nr. 3 (März 1989)
- 34) Petersen, Heinz
Brauereianlagen, Planung, Energieversorgung, Energiewirtschaft, Betriebstechnik, Kontrolle, Kennzahlen,
Nürnberg, 1987
- 35) Pfenniger, H.
25 Jahre Stiftung des Schweizerischen Bierbrauervereins für wissenschaftliche Forschung
Brauerei-Rundschau 98, Nr. 5 (Mai 1987)

36) Studerus, K.
Aspekte der Schweizer Brauindustrie,

Zürich 1989

37) Studerus, K.
Der Schweizerische Bierbrauerverein,

Zürich, März 1990

38) Willimann, M., Hunter, A., Löffel, P.
Messungen des Energieverbrauchs im Sudhausbereich Brauerei-Rundschau 94, Nr 5 (Mai 1983)

39) Willimann, M., Emch, F.
Neues Sudwerk der Brauerei Falken
Brauerei-Rundschau 94, Nr. 9 (Sept. 1983)

40) Willimann, M.
Vergleich des Energieverbrauchs in Schweizer Brauereien Brauerei-Rundschau 96, Nr. 6 (Juni 1985)

41) Willimann, M,
Energieeinsatz in der Schweizer Brauindustrie,

Dissertation, Zürich 1987

42) Willimann, M.
Erfolgreiche Energiesparprogramme in den Schweizer Brauereien, Zürich 1988

Literatur Kunststoffspritzgiessen

- 43) Arbeitsgemeinschaft der Schweizerischen Kunststoffindustrie (ASKI) Kunststoffe Werkstoffe unserer Zeit, Zürich 1988
- 44) Arbeitsgemeinschaft der Schweizerischen Kunststoff-Industrie (aski) Spritzguss
- 45) Arbeitsgemeinschaft der Schweizerischen Kunststoff-Industrie (aski) Extrusion
- 46) Arbeitsgemeinschaft der Schweizerischen Kunststoff-Industrie (aski) Kalandrieren
- 47) Krebs, C
Gummi Kautschuk, Elastomere,
Maag Technik AG, Dübendorf 1989
- 48) Krebs, C., Avondet, M-A.
Kunststoffe Polymerwerkstoffe Thermoplate - Duroplaste,
Maag Technik AG, Dübendorf 1990
- 49) Warnecke, Volkholz
Moderne Spritzgiessfertigung,
Stuttgart 1989
- 50) Wiegand, Hans-Gerd
Prozessautomatisierung beim Extrudieren und Spritzgiessen,
Aachen 1980
- 51) Wüst, F.
Spritzer- und Pressverband im Aufwind,
SWISS PLASTICS 11 (1989) Nr. 9, 29-53
- 52) Wüst, F.
Der Verband Schweizerischer Kunststoff-Press- und Spritzwerke setzt neue Wegmarken,
SWISS PLASTICS 12 (1990) Nr. 12, 21-32