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

Analyse und Modellierung des Energiebedarfes in Batch-Prozessen

ausgearbeitet durch
Patric S. Bieler
Laboratorium für Technische Chemie
Gruppe für Umwelt- & Sicherheitstechnologie, ETH Zürich
ETH Hönggerberg, HCI G138
8093 Zürich
pbieler@tech.chem.ethz.ch

im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

Zusammenfassung

Mit Hilfe dieses Projektes soll der Energiebedarf von Mehrprodukte-Mehrzweck-Batch-Betrieben in der chemischen Industrie untersucht werden. Hierzu werden die Energien Dampf, Sole und Elektrizität betrachtet.

Zur Modellierung des Energiebedarfes wurde ein „Top-down“ und ein „Bottom-up“ Ansatz durchgeführt. Einerseits wurde in einem „Top-down“ Ansatz der Energiebedarf auf Gebäudeebene analysiert (es wurde versucht, den Energieverbrauch in Abhängigkeit der totalen Produktemenge zu modellieren und entsprechende Modelle aufzubauen). Andererseits wurde in einem „Bottom-up“ Ansatz begonnen, Energieverbrauchsmodelle für einzelne Einheitsoperationen zu bilden. Mit Hilfe dieser Modelle sollte es in einer späteren Phase des Projektes möglich sein, den Energieverbrauch eines Mehrprodukte-Mehrzweck-Batch-Betriebes auf Wochenbasis (oder noch detaillierter) zu modellieren. Hierzu sollten so wenig substanz- und apparatespezifische Daten wie möglich, aber so viele wie für eine adäquate Modellierung und Anpassbarkeit der Modelle auf andere Produkte und Apparate nötig, verwendet werden.

Die Modellierung auf Gebäudeebene zeigte klar, dass diese für den stark schwankenden Produktemix des untersuchten Gebäudes (Mehrprodukte-Mehrzweck-Batch-Betrieb) und die ebenfalls schwankende Produktemenge zu ungenau ist. Die einzelnen Produkte besaßen zu unterschiedliche Produktionsprozesse, als dass Modelle auf dieser Abstraktionsebene mit genügender Genauigkeit aufgebaut werden konnten. Alleine der (von den produzierten Produkten unabhängige) Heizdampfverbrauch konnte auf Gesamtgebäudeebene mit den Heizgradtagen und dem Luftwechsel im Gebäude korreliert werden. Hieraus ergab sich ein einfaches, jedoch genaues Modell des Heizdampfverbrauches eines Produktionsgebäudes.

Sechs verschiedene Produktionsbetriebe wurden mit einander auf Gebäudeebene verglichen. Bei Batch-Monoanlagen oder Gebäuden mit wenig schwankendem Produkte-Mix (oder aber mit sehr ähnlichen Produkten) war im Gegensatz zu Mehrprodukte-Mehrzweck-Batch-Betrieben eine Modellbildung auf Gesamtgebäudeebene mit angemessener Genauigkeit möglich. Bei diesem Vergleich interessierte v.a. auch der unterschiedliche Grundverbrauch der verschiedenen Gebäude in den einzelnen Energien und der Zusammenhang dieses Grundverbrauches mit dem Verwendungszweck, dem Automationsgrad und dem Alter der verschiedenen Gebäude.

Auf Apparateebene wurden bis jetzt Modelle für Schaufeltrockner (Dampfverbrauch), für Wärmekammern (Dampfverbrauch), für Dampfstrahlvakuumpumpen (Dampf- und Wasserverbrauch) erarbeitet, sowie erste Untersuchungen zum Stromverbrauch von Rührwerksantrieben durchgeführt. Die Modelle zeigten eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten. Es wurde darauf geachtet, dass ausschliesslich standardmässig gemessene Produkt- und Produktionsdaten für die Modelle verwendet wurden. Waren diese nicht zugänglich, wurde untersucht, ob Analogieschlüsse zu anderen Substanzen zulässig waren, oder ob diese Werte überhaupt nötig waren.

In einem weiteren Schritt wird der Energieverbrauch weiterer Einheitsoperationen (z.B. Reaktoren, Batch-Destillationen, etc.) vermessen und entsprechende Energieverbrauchsmodelle ausgearbeitet werden. Mit Hilfe dieser Modelle soll anschliessend versucht werden, den Energiebedarf des Gesamtbetriebes zu modellieren.

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

Abstract

This project aims to model the energy consumption of multi-product, multipurpose batch plants. The utilities investigated are steam, brine and electricity.

Both “top down” and “bottom up” approaches were used to model energy consumption. While energy consumption at building level was investigated by the top down approach, a bottom up approach was used to investigate the energy consumption of individual unit operations. With the assistance of these unit operation models, it should be possible to model the energy consumption of a whole building on a time-scale of weeks (or even shorter). The models should use only as many product- and equipment-specific data as necessary to make the models accurate and applicable to different products and equipment.

Modelling of multi-product, multipurpose batch plants at building level clearly showed that the product mix was too variable, and diversity of the products and processes too great, for simple models based on total production throughput to be sufficiently accurate. At building level, only the steam consumption for space heating (unrelated to production output) could be correlated with degree-days and rate of air exchange. Only here could a simple but accurate model of heating steam be developed for production buildings.

Six different production plants were compared at building level. For mono batch plants, or facilities with only minor variations in the product mix (or with similar product groups), it was indeed possible to construct models at building level. Special attention was given to the differences in the base energy consumption of the buildings (consumption at zero production) and its correlation with the degree of automation and the utilization of the different buildings.

To date, several models have been constructed at unit operation level. The unit operations investigated so far comprise vacuum paddle dryers, drum-heating chambers (steam consumption), steam ejectors (steam & water consumption) and some agitator motors (electricity consumption). These models, which used only product- and equipment-specific data collected in the normal course of production, gave a good correlation with the measured values. If the required data were missing, it was considered whether data from similar products could be used or if indeed the data were needed at all to achieve adequate results.

In future studies, the energy consumption of further unit operations will be investigated (e.g. reactors...) and further energy consumption models should be constructed. These models, taken together, should allow the energy consumption of the entire building to be calculated.

Resumée

Le but de ce projet est de modéliser la consommation d'énergie des usines multi produits de production batch. Les énergies étudiées sont la vapeur, la saumure et l'électricité.

Des approches « top-down » – pour la consommation d'énergie à l'échelle du bâtiment – et « bottom-up » – pour les consommations à l'échelle des opérations unitaires – ont été utilisées pour cette modélisation ; par la modélisation des opérations unitaires, il devrait être possible de modéliser également la consommation du bâtiment complet. Ces modèles doivent à la fois utiliser aussi peu de données spécifiques de la production et de l'appareillage que possible, et se baser sur assez d'information pour pouvoir être précis et adaptables à d'autres productions et appareils.

La modélisation au niveau du bâtiment a clairement montré que la palette de produits est trop diversifiée pour obtenir des résultats probants. Cette diversité implique en effet que déjà les simples modèles représentant la production totale sont trop imprécis. Seul le chauffage des bâtiments peut être modélisé à ce niveau d'abstraction – par des modèles basés sur les « degrés à chauffer – jour » et sur la fréquence de remplacement de l'air.

Six usines de production ont été comparées via ces modèles à l'échelle du bâtiment. Les modèles à l'échelle du bâtiment n'ont été réalisables que pour les usines à monoproduction ou celles où la palette de produit ne varie que peu (ou dans lesquelles les variations se jouent sur des produits très similaires). Une attention particulière a alors été portée sur les différences en consommation énergétique de base des bâtiments (consommation à zéro production) et leur corrélation avec le degré d'automatisation et le type de production.

A ce jour, quelques modèles ont été développés à l'échelle de l'opération unitaire. Parmi ceux-ci sont compris pour l'instant les sécheurs à palettes (consommation de vapeur), les chambres de chauffage (consommation de vapeur), les pompes à vide au vapeur (consommation de vapeur et d'eau) ainsi que quelques moteurs d'agitateurs (consommation d'électricité). Les modèles révèlent une bonne corrélation avec les valeurs expérimentales mesurées. Seules les données spécifiques liées aux produits ou aux appareils qui sont habituellement rassemblées pour les chaînes de productions ont été utilisées pour construire les modèles. Si certaines données manquaient, elles ont soit été exclues du modèle, n'étant pas nécessaire pour obtenir des résultats adéquats, soit été dérivées de données tirées d'autres productions similaires.

Dans la suite de ce travail, la consommation énergétique d'autres opérations unitaires (p.ex. des réacteurs ou des colonnes de distillation) va être étudiée et des modèles vont être développés, dans le but de pouvoir modéliser la consommation de bâtiment entier.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Ausgangslage	8
	2.1 Relevanz.....	8
	2.2 Vorarbeiten	8
3	Ziel der Arbeit	9
4	Lösungsweg	10
	4.1 „Top-Down“ Untersuchung	10
	4.2 „Bottom-Up“ Untersuchung.....	11
5	Hauptergebnisse	12
	5.1 Gebäudebeschreibung	12
	5.2 Analyse auf Gebäudeebene	13
	5.2.1 Produktionsdampf	13
	5.2.2 Heizdampf.....	18
	5.2.3 Elektrizität	21
	5.2.4 Sole.....	26
	5.3 Analyse einzelner Apparate.....	30
	5.3.1 Beschreibung der Messungen	30
	5.3.2 Vakuum Schaufeltrockner	31
	5.3.3 Wärmekammer	34
	5.3.4 Rührwerksmotoren.....	36
	5.3.5 Dampfstrahlvakuumumpfen	38
6	Diskussion	39
	6.1 Gebäudeebene.....	39
	6.2 Apparateebene	39
7	Ausblick	41
8	Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	42
	8.1 Abkürzungen und Symbole.....	42
	8.2 Indizes	42
9	Literaturverzeichnis	43

Abbildungsverzeichnis

1	Schematische Darstellung des untersuchten Gebäudes 1.....	12
2	Monatlicher Produktionsdampfverbrauch im Gebäude 1 als Funktion der Produktionsleistung.....	14
3	Stündlicher Produktionsdampfverbrauch im Gebäude 1 als Funktion der Produktionsleistung.....	14
4	Produktionsdampfverbrauch vs. Apparatebelegungsstunden pro Tag im Gebäude 1	15
5	Produktionsdampfverbrauch vs. aktive Apparate (Stundenbasis) im Gebäude 1	16
6	Totaler Produktionsdampf (5 und 15 bar) vs. Produktmenge der verschiedenen Gebäude	17
7	Heizdampfverbrauch (5 bar) in Abhängigkeit der Heizgradtage	19
8	Mit Luftumwälzung normalisierter Heizdampfverbrauch vs. Heizgradtage.....	20
9	Kraftstromverbrauch pro Monat des Gebäudes 1	21
10	500 V Stromverbrauch pro Stunde im Gebäude 1	22
11	500 V Stromverbrauch pro Stunde vs. belegte Apparate im Gebäude 1.....	22
12	Vergleich des Stromverbrauches der untersuchten Gebäude (exklusiv Strom zur Kühlmedienproduktion).....	23
13	Verlauf des Grundverbrauchs des Kraftstromes des Gebäudes 1 (Woche 19; 2001).....	25
14	Monatlicher Kühlsoleverbrauch vs. Produktionsleistung im Gebäude 1.....	27
15	Stündlicher Kühlsoleverbrauch vs. Produkte in Arbeit für Gebäude 1 (Woche 19; 2001).....	28
16	Täglicher Kühlsoleverbrauch vs. Apparatebelegungsstunden im Gebäude 1 (Woche 19; 2001).....	28
17	Vergleich des monatlichen Kühlmedienverbrauches der verschiedenen Gebäude	29
18	Mit Gleichung (7) berechneter und gemessener Dampfverbrauch zweier verschiedener Schaufeltrockner	33
19	Aufteilung des gemessenen Dampfverbrauches (Trockner 1, Produkt B).....	34
20	Mit Gleichung (8) berechneter und gemessener Dampfverbrauch für eine Wärmekammer.....	35
21	Theoretischer Dampfverbrauch für Wassererwärmung, verglichen mit dem gemessenen Dampfverbrauch	35
22	Leistungsaufnahme eines Rührers während Produktion in einem 6.3 m ³ Rührbehälter	36
23	Durchschnittliche Leistungsaufnahme vs. Nennleistung für verschiedene Rührertypen	37

Tabellenverzeichnis

1	Untersuchte Gebäude	13
2	Test der mobilen Dampfmesstation.....	31
3	Dampf- und Kühlwasserverbrauch versch. vierstufiger Dampfstrahlvakuum-pumpen gemäss Produktkatalog von <i>GEA Jet Pumps</i>	38

1 Einleitung

In Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Energie (BFE) wurde im Sommer 2000 ein Dissertationsprojekt unter dem Titel „Analyse und Modellierung des Energiebedarfes in Batch-Prozessen“ gestartet. Das Projekt wird voraussichtlich bis Frühjahr 2004 dauern. Dieser Zwischenbericht, stellt sowohl eine Standortbestimmung, als auch eine Fortschrittsüberprüfung des Projektes dar. Er soll den jetzigen Stand des Projektes, sowie den weiteren Verlauf, wie er zum jetzigen Zeitpunkt gesehen wird, aufzeigen, jedoch noch keine endgültigen Schlüsse ziehen.

Zuerst wird in **Kapitel 2** die Ausgangslage abgeklärt und die Relevanz der Arbeit erläutert. In **Kapitel 3** wird das Ziel der Arbeit umrissen, während in **Kapitel 4** der Lösungsweg aufgezeigt wird. In **Kapitel 5** werden die Hauptergebnisse dargestellt. Analysen auf Gebäude- und Einheitsoperationenebene wurden durchgeführt und werden in diesem Kapitel ausführlich besprochen. Diskussion des bis jetzt erreichten und ein Ausblick auf die noch ausstehenden Arbeiten und Untersuchungen beschließen diesen Bericht in **Kapitel 6** und **Kapitel 7**.

2 Ausgangslage

2.1 Relevanz

Der Energieverbrauch chemischer Produktionsprozesse ist unmittelbar mit ihrem Ressourcenverbrauch verbunden. Je weniger Ressourcen die Herstellung einer bestimmten Menge Produkt (oder funktioneller Einheit, falls der Nutzen oder die Funktion einer Substanz betrachtet wird) verbraucht, desto umweltfreundlicher ist die Produktion. Aus diesem Grunde wurde der Energieverbrauch chemischer Prozesse auch als sechstes Prinzip von „Green Chemistry“ aufgeführt [1].

Der Energieverbrauch von kontinuierlichen Produktionen (z.B. Erdöldestillation oder Kunststoffherstellung) wurde in der Vergangenheit bereits intensiv untersucht und Methoden zur Minimierung und Effizienzsteigerungen konnten entwickelt werden (z.B. Pinch-Analyse zur Wärmeintegration [2]). Äquivalente Untersuchungen und Möglichkeiten zur Optimierung stecken bei der Batch-Produktion noch in den Kinderschuhen [3]. Oft sind diese Methoden für den Gebrauch in der industriellen Praxis zu kompliziert und finden deshalb kaum Anwendung [4]. Somit verhindern bisher einerseits die komplexen Abläufe und die inhärente Diskontinuität von Batch-Produktionen und andererseits die höheren Margen (verglichen mit der kontinuierlichen Produktion), welche oft für Produkte der Batch-Chemie erzielt werden, eine breite Anwendung von Energieanalyse in Batch-Prozessen.

Um Aussagen zu Effizienz und Verbesserungspotenzialen von Batch-Produktionsanlagen machen zu können, müssen zuerst Standardwerte bekannt sein und Möglichkeiten zur Modellierung und Vorhersage des Energieverbrauches von Produktionsprozessen vorhanden sein. Energieeinsparungsziele sind nur sinnvoll, wenn klar ist, wie hoch der theoretisch mögliche und der praktisch erzielbare minimale Energieverbrauch im Vergleich zum effektiven Energieverbrauch ist (d.h. wie gross das Einsparpotenzial im besten Fall sein kann). Ist dies bekannt, kann das Augenmerk auf das Einsparpotenzial der grössten Energieverbraucher gelegt werden oder Energieintegration vorangetrieben werden. Dies garantiert, dass die knappen Ressourcen nicht für minimale Einsparpotenziale vergeudet werden während gleichzeitig einfach zu realisierende Einsparungen nicht durchgeführt werden.

2.2 Vorarbeiten

Anhand eines Fallstudiengebäudes eines chemischen Betriebes (Mehrprodukte-Mehrzweck-Batch-Betrieb) soll die Methodik einer früheren Arbeit [5] verfeinert und auf lösungsmittelbasierte Produktion erweitert werden. Besonderes Augenmerk soll auf Praxisrelevanz und gemessene Daten gelegt werden.

Nur sehr wenige Arbeiten befassen sich mit dem Problem des Energieverbrauches von Batch Prozessen und diese meist ausschliesslich mit der Wärmeintegration von Batch-Betrieben (siehe z.B. [6-10]). Weitergehende Arbeiten über Energieoptimierung bei Batch-Prozessen wurden z.B. von P. Krummenacher durchgeführt [11-13]. Übergreifende Arbeiten zur Modellierung des totalen Energieverbrauches von chemischen Produktionsbetrieben (Elektrizität, Dampf, Sole) fehlen völlig.

3 Ziel der Arbeit

Ziel des Projektes ist es, einfach anpassbare Energieverbrauchsmodelle für die häufigsten Einheitsoperationen in chemischen Mehrprodukte-Mehrzweck-Batch-Betrieben aufzubauen. Diese Modelle sollten es erlauben, den Energieverbrauch eines solchen Betriebes mit Hilfe möglichst weniger substanz- und apparatespezifischer Daten, sowie einem Produktionsplan mit hinreichender Genauigkeit zu modellieren.

Zudem werden Grundverbrauch (Lüftung, Vakuum, etc.) und Stillstandsaufnahmen erfasst und vom Gesamtverbrauch abgetrennt. Somit können Produktions- und Infrastrukturverbrauch einander gegenübergestellt werden.

Diese Untersuchungen sollen es in einer späteren Phase erlauben, Energieeinsparpotenziale zu identifizieren und die limitierten Kräfte auf die grössten Problemfelder zu konzentrieren.

Verschiedene Produktionsgebäude sollen miteinander verglichen und grundlegende Unterschiede im Energieverbrauch zwischen den unterschiedlichen Produktionen sollen herausgearbeitet werden.

Analysen sollen sowohl auf Gebäudeebene, wie auf Apparateebene durchgeführt werden. Modelle auf Gesamtgebäudeebene hätten den Vorteil, dass sehr wenige Messwerte verwendet werden müssten und die Modelle dadurch erheblich einfacher würden, als die Modellierung auf Apparateebene. Der Vorteil der Modellierung auf Apparateebene hingegen ist, dass genauere Analysen möglich sind und zudem grosse Verbraucher sofort augenfällig werden.

4 Lösungsweg

Zur Lösung der gestellten Aufgaben wurden zwei unterschiedliche Wege beschrieben: „top down“ und „bottom up“ Untersuchungen wurden durchgeführt. Diese beiden unterschiedlichen Wege sollen im Folgenden kurz beschrieben werden.

4.1 „Top-Down“ Untersuchung

Hierbei handelt es sich um eine „black box“ Betrachtung auf der Ebene des gesamten Betriebes. Ähnliche Untersuchungen wurden bereits früher durchgeführt [5]. Der Energieverbrauch des gesamten Gebäudes wird gemessen und mit der total produzierten Produktmenge (in Tonnen) in Korrelation gesetzt. Dies kann auf Stunden-, Tages-, Wochen-, Monats- oder Jahresbasis durchgeführt werden, wobei bei einer Auflösung im Bereich von Stunden und Tagen nicht die tatsächlich ausgestossenen Mengen, sondern die in Produktion befindlichen Mengen (aufgrund der Betriebsvorschrift (BVO) bekannt) untersucht wurden. Die sich ergebenden Modelle besäßen die Form von Gleichung (1).

$$E = K * CM + C \quad (1)$$

Hierbei ist E der betrachtete Energieverbrauch in MWh, K eine Konstante, welche den spezifischen Energieverbrauch pro t Produkt beschreibt, CM die Chemikaliemenge in t und C beschreibt den Energieverbrauch bei eingestellter Produktion in MWh (warmer Betrieb, Infrastrukturanlagen laufen, jedoch wird kein kg Produkt hergestellt).

Eine weitere Möglichkeit bildet die Untersuchung der pro Stunde laufenden Apparate (sog. Apparatestunde). Diese können mit Hilfe der im Betrieb vorhandenen Produktionsprotokolle (PP) identifiziert werden. Als Auflösungsgenauigkeit wurde hierbei eine Stunde gewählt. Als Apparate gelten hierbei sämtliche Hauptapparate des Betriebes (Rührkessel, Nutschen, Destillationen, grosse Vakuumpumpen, etc.)

Gesamthaft ist es essenziell, den Grund- und Infrastrukturverbrauch des Gebäudes (Grundverbrauch) vom Produktionsverbrauch (von der Produktion verursachter und von ihr abhängiger Verbrauch) abzugrenzen. Hierzu sollen die Infrastrukturanlagen, sowie die Verluste der Energien ausgemessen und in Relation zum Gesamtenergieverbrauch gestellt werden.

Mit diesen Ansätzen sollte es möglich sein, mit minimalen Daten und geringem Messaufwand (insbesondere bestünde keine Notwendigkeit zur Installation neuer Messstellen, da die Gesamtmengen an Energie eines Betriebes meist standardmäßig gemessen werden) Modelle für den Energieverbrauch von Produktionsgebäuden zu entwickeln. Auch Kennzahlen für spezifische Produktionsgebäude (z.B. lösungsmittelbasierter Betrieb, Produktion mit wässriger Chemie, Trocknungsbetrieb, Batch Mono-Anlage, etc.) könnten durch diesen Ansatz gefunden werden, was eine rasche Identifikation der wichtigsten Charakteristiken eines Betriebes ermöglichen würde.

Ein Produktionsgebäude (Gebäude 1) wurde in dieser Studie intensiv untersucht. Zur Validierung und zum Vergleich mit anderen Gebäuden wurden fünf weitere Gebäude auf Gesamtgebäudeebene untersucht. Hierbei wurden sowohl dem Gebäude 1 ähnliche Betriebe (Gebäude 2), als auch völlig andere Betriebe (z.B. Gebäude 4 oder 6) untersucht. Die Unterschiede zwischen und die Gemeinsamkeiten der einzelnen Gebäuden waren hierbei von besonderem Interesse.

4.2 „Bottom-Up“ Untersuchung

Dieser Weg hat zum Ziel, den produktionsabhängigen Teil des Energieverbrauches durch Untersuchung einzelner Einheitsoperationen zu modellieren (der produktionsunabhängige Teil des Energieverbrauches wurde bereits in der „top-down“ Untersuchung abgegrenzt). Hierzu wird der Energieverbrauch der wichtigsten Einheitsoperationen (z.B. Trockner, Reaktoren, Destillationen) vermessen. Zudem wird aufgrund der Produkte- und Apparatespezifikationen der theoretische Energieverbrauch der Operationen berechnet. Mit Hilfe eines Verlusttermes kann alsdann der Energieverbrauch theoretischer Gleichungen des Typs von Gleichung (2) den gemessenen Daten angepasst werden und somit ein brauchbares Modell gebildet werden.

$$E = E_P + E_E + V * t \quad (2)$$

Bei dieser Gleichung entspricht E dem totalen Energieverbrauch in MWh, E_P dem theoretischen Energieverbrauch in MWh, welcher durch das Produkt verursacht wird, E_E dem theoretischen Energieverbrauch in MWh, welcher durch die Apparatur verursacht wird und $V * t$ entspricht den von der Zeit abhängigen Verlusten.

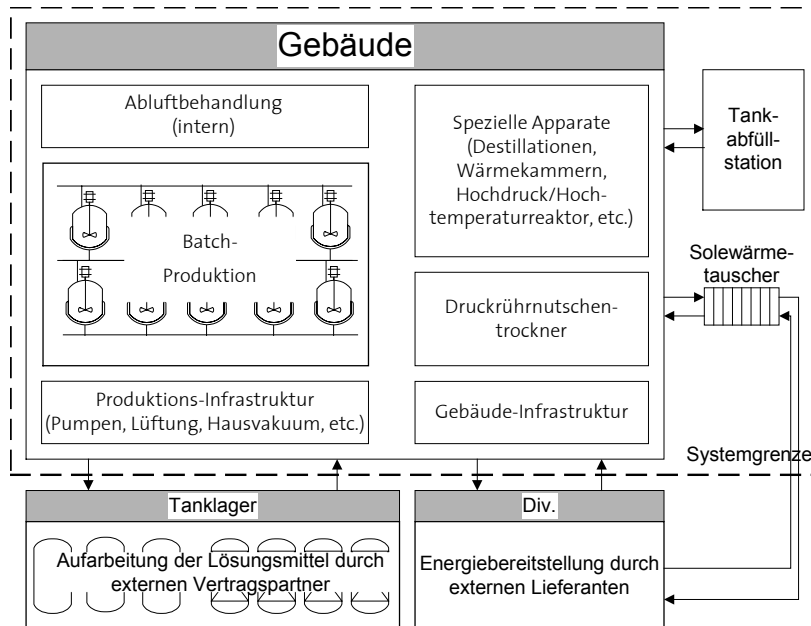
Mit Hilfe dieser einheitsoperationsspezifischen Energieverbrauchsmodelle, der Kenntnis über den Gebäudespezifischen Grund- und Infrastrukturverbrauch, sowie den Daten aus BVO, PP und Apparatespezifikationen sollte es möglich sein, den Gesamtenergieverbrauch eines Gebäudes zu modellieren.

5 Hauptergebnisse

Die Hauptergebnisse der bisherigen Arbeit sollen in den folgenden Kapiteln kurz erläutert werden. Eine Analyse auf Gebäudeebene („top-down“ Untersuchungen, siehe Kapitel 4.1), sowie Analysen auf Apparateebene („bottom-up“ Untersuchungen, siehe Kapitel 4.2) wurden durchgeführt. Die bisherigen Ergebnisse werden im Einzelnen besprochen werden.

5.1 Gebäudebeschreibung

Beim in dieser Studie untersuchten Gebäude handelt es sich um einen Mehrzweck-Mehrprodukte-Batch-Betrieb. Eine schematische Darstellung des Betriebes ist aus Figur 1 ersichtlich. Das Gebäude teilt sich in eine Batch-Produktion, verschiedene Infrastrukturanlagen (Abluftbehandlung, Gebäude-Infrastruktur, Produktionsinfrastruktur), sowie spezielle Einheitsoperationen (z.B. Druckrührnutschentrockner, Wärmekammern, Kurzwegdestillation, etc.) auf. Sämtliche untersuchten Energien (Dampf, Elektrizität, Sole) werden von einem externen Lieferanten eingekauft. Ebenfalls extern findet die Aufarbeitung oder thermische Verwertung der eingesetzten Lösungsmittel statt.



Figur 1: Schematische Darstellung des untersuchten Gebäudes 1

Das Gebäude 1 produziert im Verlaufe eines durchschnittlichen Jahres ca. 14 unterschiedliche Produkte, in wechselnder Kampagnenlänge. Der Mix der hergestellten Produkte ändert ebenfalls von Jahr zu Jahr. Sämtliche Anlagen (mit Ausnahme einer speziellen Apparatur für Hochdruckreaktionen) sind Mehrzweckanlagen, welche nicht für ein spezielles Produkt ausgelegt sind.

Die hergestellten Produkte unterscheiden sich stark in Bezug auf ihre Produktionsparameter (z.B. Reaktionstemperaturen von $< 0\text{ °C}$ bis $> 200\text{ °C}$). Es wird im 7-Tage-Betrieb rund um die Uhr gearbeitet.

5.2 Analyse auf Gebäudeebene

Die Analyse auf Gebäudeebene wurde für verschiedene Produktionsgebäude durchgeführt. Eine Auflistung dieser verschiedenen Gebäude ist aus Tabelle 1 ersichtlich.

Tabelle 1: Untersuchte Gebäude

Gebäude	Beschreibung
Gebäude 1	Hauptsächlich untersuchtes Produktionsgebäude (Mehrprodukte-Mehrzweck-Batch-Betrieb, lösungsmittelbasiert)
Gebäude 2	Vorhergehend untersuchtes Produktionsgebäude (Mehrprodukte-Mehrzweck-Batch-Betrieb, lösungsmittelbasiert)
Gebäude 3	In [5] untersuchtes Gebäude (Mehrprodukte-Mehrzweck-Batch-Betrieb, wasserbasiert)
Gebäude 4	Mehrprodukte-Mehrzweck-Trocknungsbetrieb
Gebäude 5	Mehrprodukte-Batch-Betrieb mit Linienproduktion, lösungsmittelbasiert
Gebäude 6	Batch-Monoanlage, lösungsmittelbasiert

Die Analyse und die Schlussfolgerungen auf verschiedenen Detaillierungsebenen werden jeweils exemplarisch anhand des Gebäudes 1 dargestellt. Zur Validierung und Generalisierung der Ergebnisse, werden die verschiedenen Gebäude anschließen auf Monatsebene hinsichtlich ihres Energieverbrauches mit einander verglichen.

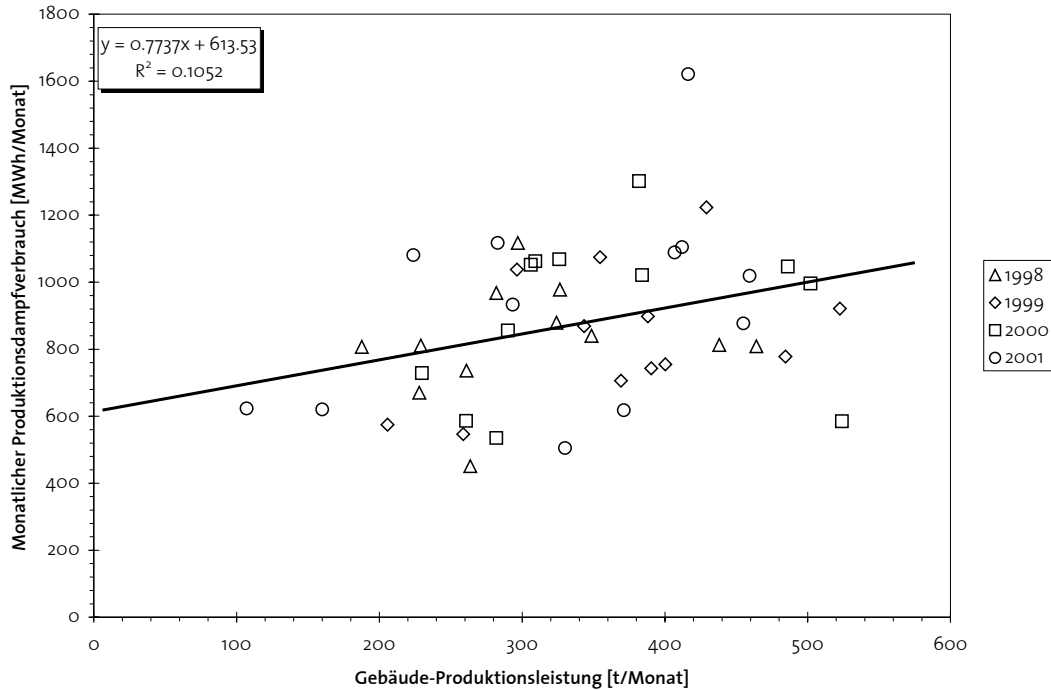
5.2.1 Produktionsdampf

Produktionsdampf wird im Gebäude 1 auf zwei verschiedenen Druckstufen (5 und 15 bar¹) verwendet. Zähler für beide Druckstufen sind vorhanden, so dass einige der Analysen für die zwei Druckstufen separat durchgeführt werden konnten. Die BVOs gaben Auskunft darüber, Dampf welchen Druckes für die einzelnen Operationen verwendet wurde und welche Einheitsoperationen überhaupt Dampf benötigten.

Verschiedene Detaillierungsebenen

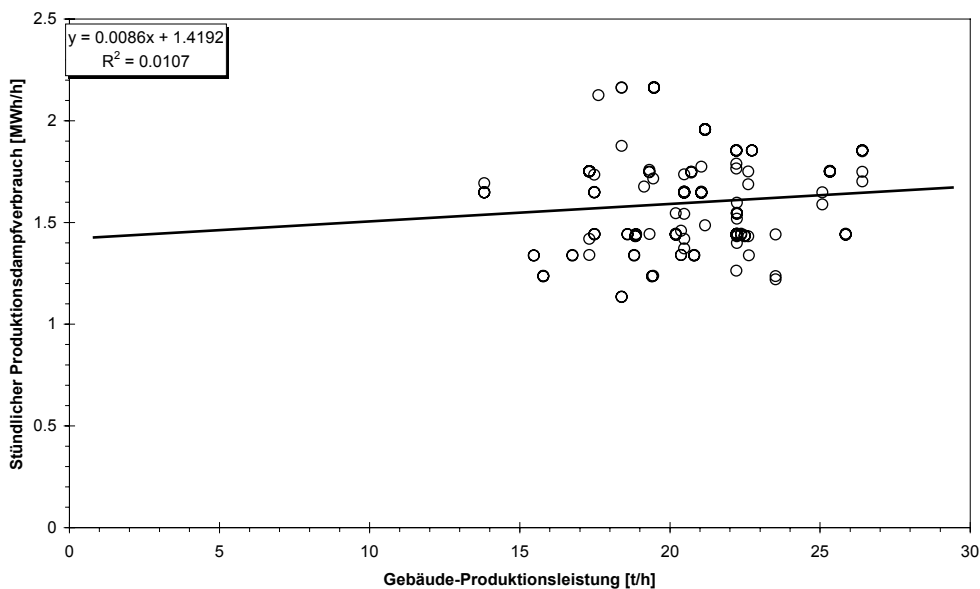
Exemplarisch für verschiedene Detaillierungsstufen wird in Figur 2 der monatliche und in Figur 3 der stündliche Produktionsdampfverbrauch in Korrelation mit der produzierten Chemikalienmenge im selben Zeitraum gesetzt. Wie die Abbildungen zeigen, konnte, im Unterschied zu den Ergebnissen in [5], auf dieser Abstraktionsstufe keine befriedigenden Modelle gebildet werden.

¹ Die Druckstufen unterscheiden sich durch das unterschiedliche Temperaturniveau von ca. 160 °C für den 5 bar und ca. 200 °C für den 15 bar Dampf (jeweils Überdruck). Der Energieinhalt beider Druckstufen wurde zu 0.80749 MWh/t angenommen (durchschnittliche Angaben des Energiezulieferers).



Figur 2: Monatlicher Produktionsdampfverbrauch im Gebäude 1 als Funktion der Produktionsleistung

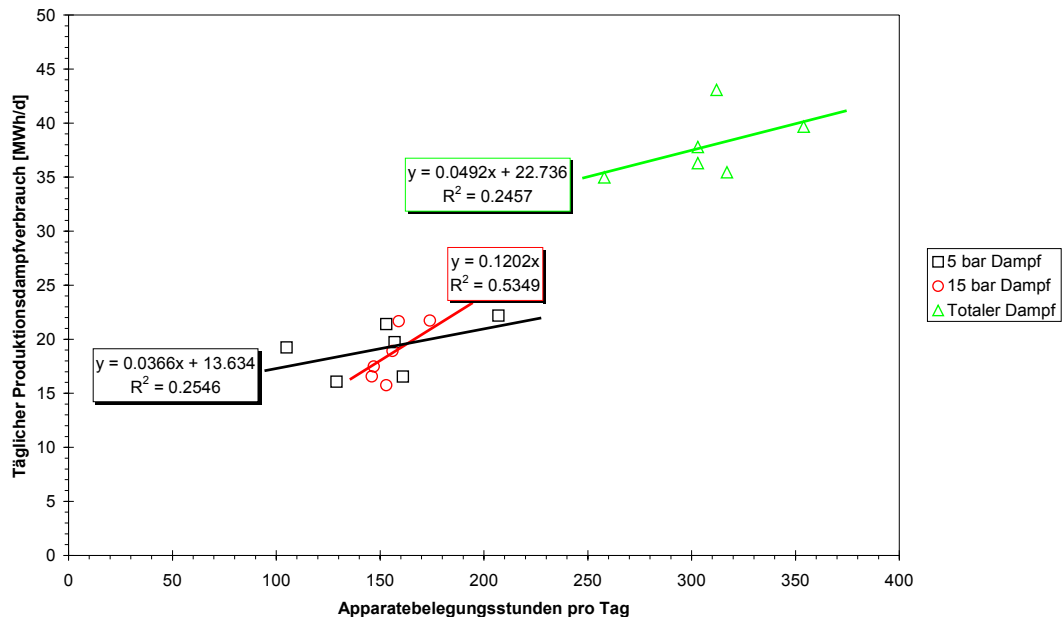
Die Punktwolken zeigen klar, dass die verschiedenen Produkte stark unterschiedliche Produktionswege und –Parameter besitzen und der Produktemix ebenfalls stark schwankend ist. Einfache Modelle in der Form von Gleichung (1), wie sie in [5] aufgrund der unterschiedlichen Produktemixstruktur auf Gesamtgebäudeebene entwickelt werden konnten, sind somit nicht möglich.



Figur 3: Stündlicher Produktionsdampfverbrauch im Gebäude 1 als Funktion der Produktionsleistung

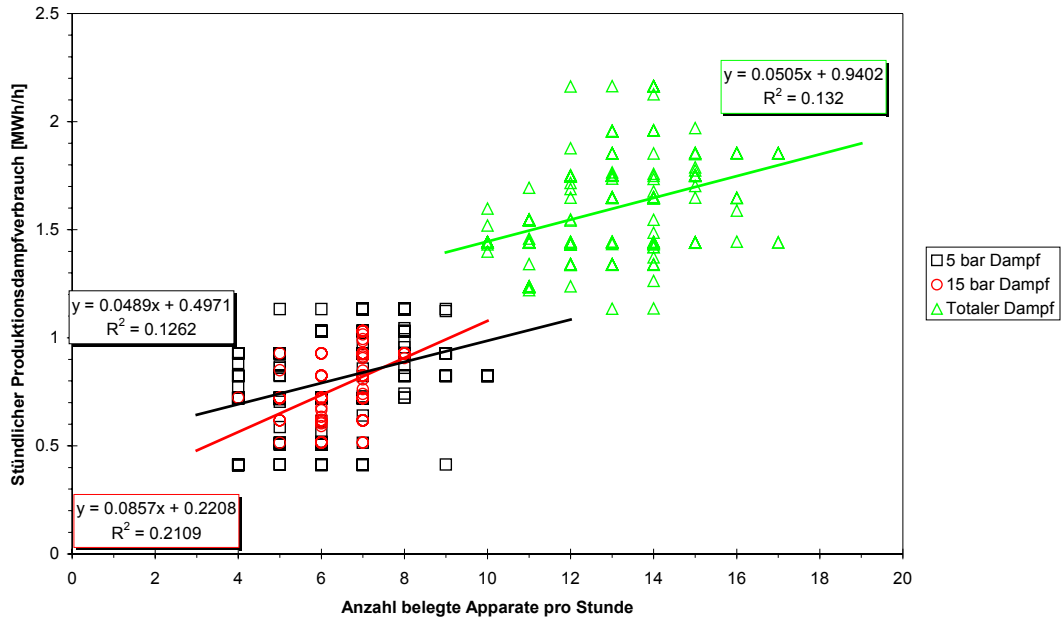
Da der Dampfverbrauch ausschliesslich von genau definierten Einheitsoperationen ausgeht (abgesehen von den Netzverlusten), wurde aufgrund der unbefriedigenden Resultate der obigen Auswertungen versucht, den Dampfverbrauch sowohl auf Tages-, wie auf Stundenbasis den aktiven „Apparaten“ zuzuordnen (sog. Apparatebelegungsstunden). Als Apparate galten dabei sämtliche Hauptapparate wie Reaktoren, Druckrührnutschen, Destillationskolonnen, Dampfstrahlvakuumumpfen, etc.). Diese Analyse wurde durch die PP ermöglicht, in denen für jeden Hauptapparat aufgelistet wird, wann er für welchen Produktionsprozess benötigt wird. Es wurde die Woche 19 im Jahre 2001 untersucht, da diese Woche als für das Gebäude 1 als eine typische Woche angesehen wurde. Die Ergebnisse sind aus Figur 4 (Tagesbasis) und Figur 5 (Stundenbasis) ersichtlich. Es ist zu erkennen, dass auch auf diesem Abstraktionsniveau kein adäquates Modell für den Dampfverbrauch des Gebäudes entwickelt werden konnte. Die einzelnen Operationen sind zu unterschiedlich, als dass eine Betrachtung auf dieser Ebene zu einem brauchbaren Resultat führen würde.

Auch zeigt sich aus den Untersuchungen, dass jeweils ein sogenannter Betriebs- oder Verlustterm besteht (Verbrauch bei „Produktion“ von null Tonnen Produkt, resp. null Apparatebelegungsstunden²; vgl. [5]), dieser kann jedoch aufgrund des geringen Korrelationskoeffizienten nicht eindeutig bestimmt oder auch nur eingegrenzt werden. Erst genauere Messungen auf Apparateebene könnten hier Aufschluss geben.



Figur 4: Produktionsdampfverbrauch vs. Apparatebelegungsstunden pro Tag im Gebäude 1

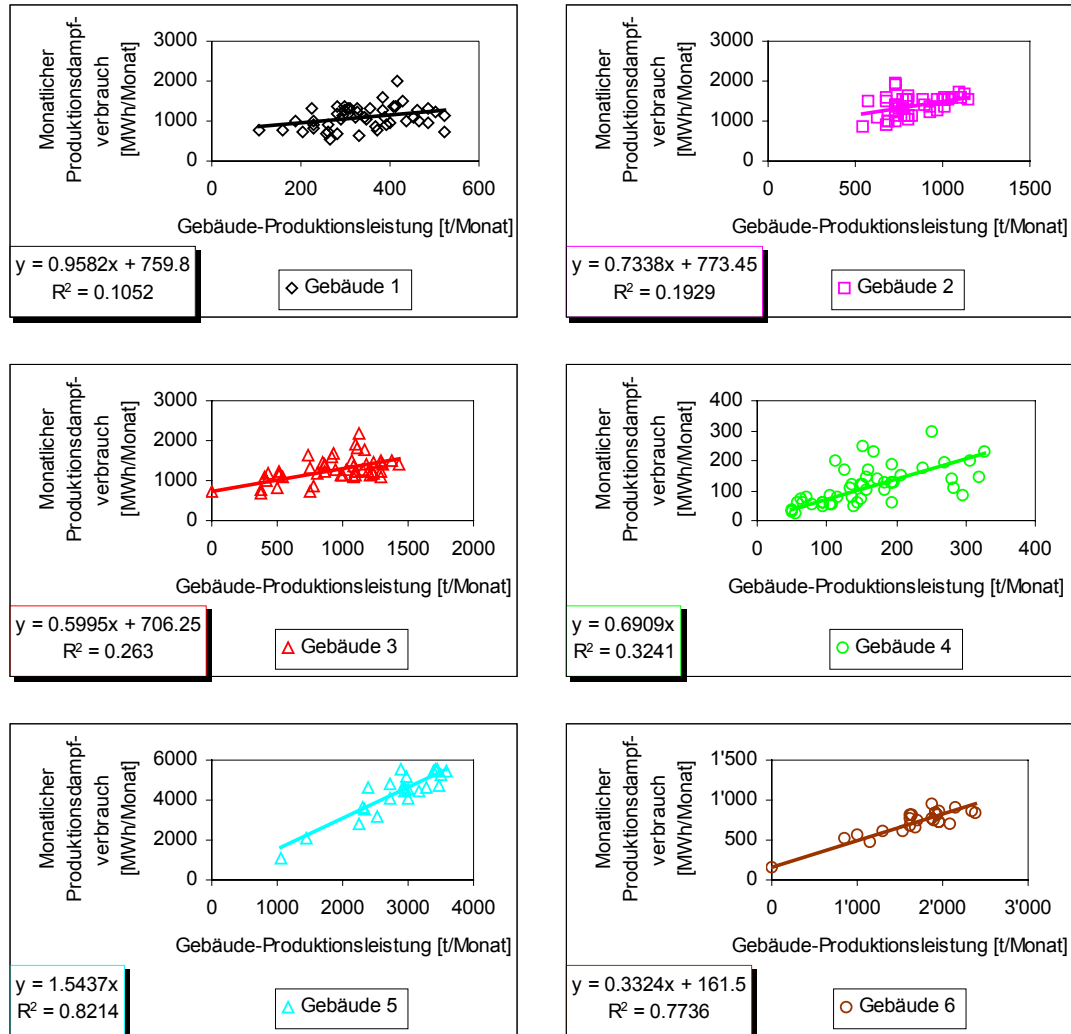
² Warmer Betrieb, welcher jedoch noch nichts produziert



Figur 5: Produktionsdampfverbrauch vs. aktive Apparate (Stundenbasis) im Gebäude 1

Vergleich der untersuchten Gebäude

Ein Vergleich des Produktionsdampfverbrauches der verschiedenen Gebäude ist aus Figur 6 ersichtlich.



Figur 6: Totaler Produktionsdampf (5 und 15 bar) vs. Produktmenge der verschiedenen Gebäude

Die Abbildungen der beiden Mehrprodukte-Mehrzweck-Batch-Betriebe 1 und 2 zeigen einen relativ hohen Grundverbrauch der beiden Gebäude und eine schwache Abhängigkeit des Produktionsdampfverbrauches von der totalen Produktionsmenge. Die Produkte sind zu unterschiedlich, als dass sich eine klare Korrelation zwischen produzierter Tonnage und Produktionsdampfverbrauch herstellen liesse.

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei Gebäude 3. Zwar ist die Korrelation hier etwas besser als bei den Gebäuden 1 und 2, jedoch lässt sich auch hier kein ausreichend genaues Modell auf Gebäudeebene herstellen. Es zeigt sich wiederum, dass ein relativ grosser Teil des Dampfverbrauches auch bei stillstehender Produktion vorhanden ist und als sog. Grundverbrauch unabhängig von der produzierten Tonnage ist.

Gebäude 4 zeigt eine etwas höhere Korrelation zwischen getrockneter Produktmenge und Trocknungsdampfverbrauch. Eine Erklärung hierfür ist, dass die für verschiedene chemische Produktionen Verwendung findenden organischen Lösungsmittel bezüglich ihrer Verdampfungswärmen und Wärmekapazitäten sich nicht

im selben Masse unterscheiden, wie sich unterschiedliche chemische Produktionsprozesse unterscheiden können. Zudem findet nur eine beschränkte Anzahl von Lösungsmitteln in einem Betrieb Anwendung, wodurch sich die Lösungsmittelzusammensetzung sogar bei wechselnder Produktion nur unwesentlich ändern kann. Die Daten zeigen, dass dampfverbrauchende Infrastrukturanlagen nur in geringem Masse vorhanden sind.

Bei Gebäude 5 ist ersichtlich, dass bei Linienproduktion im Batch-Betrieb, sich der Produktemix nicht ändert und deshalb eine angemessene Korrelation zwischen Produktmenge und Produktionsdampfverbrauch erstellen lässt (die beste Korrelation aller untersuchten Gebäude. Der fehlende Achsenabschnitt der Korrelation zeigt, dass in diesem Betrieb die Netzverluste des Dampfes nur gering sind und Infrastrukturanlagen nur einen minimalen Teil des Produktionsdampfes verbrauchen.

Gebäude 6 zeigt ebenfalls eine sehr gute Korrelation zwischen Produktmenge und Produktionsdampfverbrauch. Hierbei handelt es sich um eine Batch-Monoanlage, welche nur ein einziges Produkt herstellt. Der „Produktemix“ bleibt somit völlig konstant, was die gute Korrelation erklärt.

Netzverluste

Während einer fröhsummerlichen Abstellperiode wurden Messungen zum absoluten Dampfverlust des Gebäudes 1 durchgeführt. Hierzu wurden die leeren Apparaturen vom Dampfnetz getrennt (Ventile geschlossen), das gesamte Dampfnetz (Ringleitung) jedoch offen gelassen. Hierdurch konnten die Verluste der Dampfverteilung des Gebäudes 1 untersucht werden. Diese Verluste lagen unter der Nachweisgrenze des Messgerätes von 0.12 t/h (entspricht ca. 87 t/Monat resp. ca. 70 MWh/Monat)³. Verglichen mit einem Grundverbrauch von ca. 700 MWh/Monat (siehe Regression in Figur 6), liegen die Netzverluste somit unterhalb von 10 %. Neben der Abstrahlung sind sicherlich falsch angebrachte, unnötige oder defekte Kondensatableiter mitverantwortlich für den Dampfverlust [14] – kontinuierliche Kontrollen könnten hier von Nutzen sein.

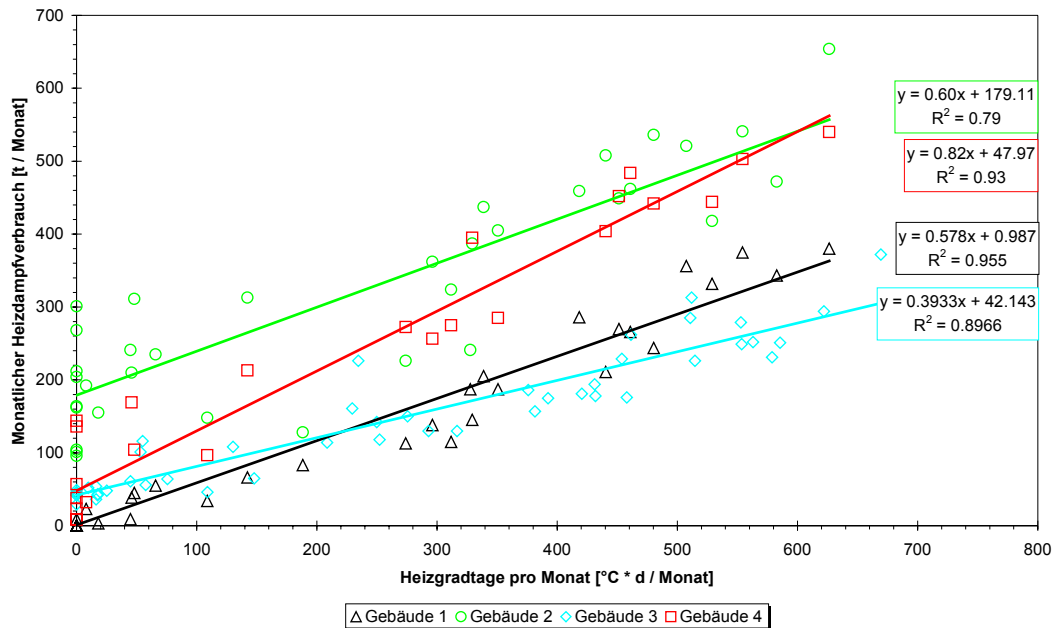
5.2.2 Heizdampf

Der Heizdampfverbrauch der Gebäude 1 bis 4 wurde gemessen und untersucht. Die Gebäude 5 und 6 verwenden das Kondensat aus dem Produktionsdampf für die Gebäudeheizung. Hierbei bestehen keine Energieverbrauchszähler. Aus diesem Grunde konnte der Heizenergieverbrauch dieser Gebäude nicht untersucht werden.

Verbrauchsuntersuchungen

Der Heizdampfverbrauch wurde durch monatliche Zählerablesungen erfasst. Erste Untersuchungen zeigten, dass beim Heizdampf eine Analyse auf verschiedenen Detaillierungsebenen (Stunden-, Tage-, Wochenbasis) zu keinen nennenswert neuen Resultaten führt. Deshalb beschränkt sich dieser Bericht auf die Darstellung des Heizenergiebedarfes auf Monatsbasis.

³ 1 t Dampf entspricht 0.80749 MWh



Figur 7: Heizdampfverbrauch (5 bar) in Abhängigkeit der Heizgradtage⁴

Eine Darstellung des absoluten Heizenergieverbrauches in Abhängigkeit der Heizgradtage⁴ ist aus Figur 7 ersichtlich. Es zeigt sich eine klare Abhängigkeit des Heizenergiebedarfes von den Heizgradtagen. Der hohe Grundverbrauch von Gebäude 2 ist dadurch zu erklären, dass bei diesem Produktionsgebäude einige Produktionsinfrastrukturen aus Sicherheitsgründen (Dampfversorgung über Wochenendabschaltung bei 5-Tage-Betrieb) durch Heizdampf gespiesen wurden. Abgesehen vom erklärten Unterschied im Grundverbrauch ist ersichtlich, dass Gebäude 1 und 2 bezüglich ihres Heizenergiebedarfes sehr ähnlich sind (äquivalente Steigung der Geraden, jedoch unterschiedlicher Achsenabschnitt (Grundverbrauch)). Dies ist aufgrund der Ähnlichkeit der beiden Gebäude (beides Mehrprodukte-Mehrzweck-Batch-Betriebe mit lösungsmittelbasierter Produktion und vergleichbarer Grösse) nicht weiter verwunderlich.

Die Produktionsprozesse in Gebäude 3 benötigen nur wenig Heizleistung (werden bei moderaten Temperaturen durchgeführt). Die daraus resultierende kleinere Wärmeabstrahlung der Apparaturen würde einen steileren Anstieg des Heizdampfverbrauches mit zunehmenden Heizgradtagen pro Monat erwarten lassen (geringerer Wärmeeintrag durch Apparaturen bedingt grösseren Heizenergiebedarf). Diese Annahme wird durch die Analysen in Figur 7 allerdings nicht bestätigt.

Das auf Trocknung von Produkten spezialisierte Gebäude 4 dürfte demgegenüber eine erheblich grössere Abstrahlung der Apparaturen aufweisen. Trotzdem zeigt sich ein steilerer Anstieg des Heizdampfverbrauches mit den Heizgradtagen.

Sämtliche Gebäude sind insofern vergleichbar, als es sich um ältere chemische Produktionsbetriebe handelt, deren Gebäudehüllen kaum isoliert sind und welche eine relativ grosse Luftumwälzung besitzen. Der Heizenergiegrundverbrauch von Gebäude 1, 3 und 4 sind vergleichbar und relativ klein (Abschalten des Heizdampfnetzes während Sommermonaten). Der Hohe Grundverbrauch von Gebäude 2 ist,

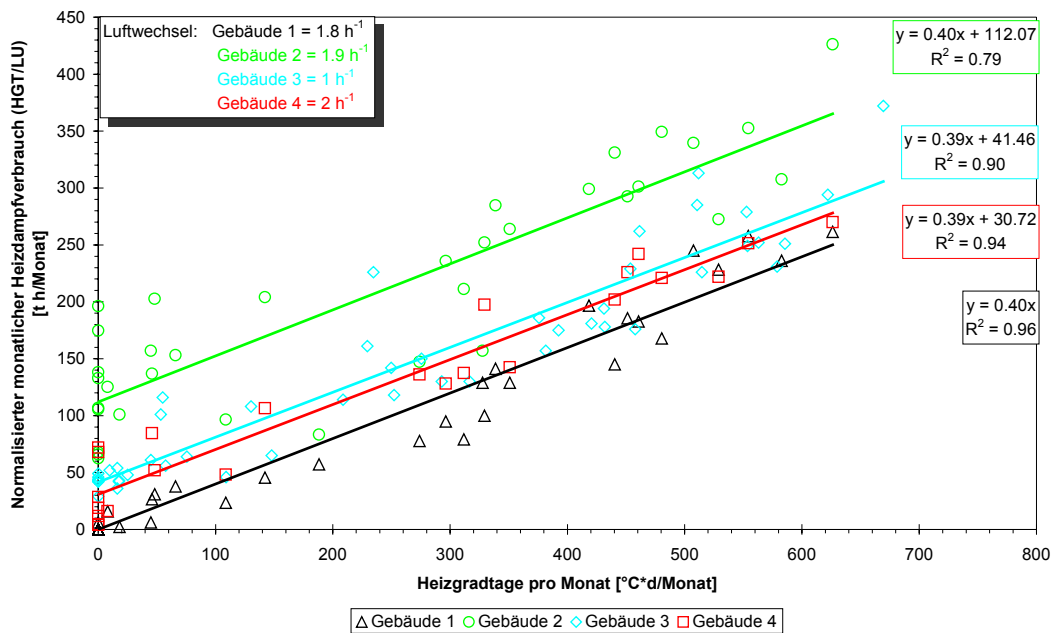
⁴ Angenommene Heizgrenze: 12°C; zur Erklärung der Heizgradtage siehe z.B. <http://www.fh-wolfenbuettel.de/tww/EnEV-files/Heizgradtage%20und%20Gradtagszahl.pdf>; mittlere Tagestemperaturen von meteorologischer Anstalt Basel-Binningen

wie oben erwähnt, dadurch erklärbar, dass in diesem Gebäude einige Infrastrukturanlagen (Heizungen für Lagertanks) während der Wochenenden (Abstellphase im 5-Tage-Betrieb) aus Sicherheitsgründen durch Heizdampf gespiesen wurden.

Aufgrund der grossen Luftumwälzung wurde untersucht, welchen Einfluss das Lüftungsregime der einzelnen Gebäude auf den Heizdampfverbrauch hat. Zu diesem Zwecke wurde der Luftwechsel⁵ (h^{-1}) der einzelnen Gebäude berechnet und der Heizdampfverbrauch mit diesem Wert normalisiert, wodurch sich das in Figur 8 dargestellte Bild ergab. Die Steigungen sämtlicher Regressionsgeraden zeigen nun einen annähernd identischen Wert von $0.4 \cdot (\text{t} \cdot \text{h}) / (\text{°C} \cdot \text{d})$, womit sich das in Gleichung (3) dargestellte Modell für den Heizenergiebedarf eines chemischen Produktionsbetriebes entwickeln lässt.

$$\text{HDV} = 0.4 \cdot \text{LU} \cdot \text{HGT} + \text{K} \quad (3)$$

Hierbei bezeichnet HDV den Heizdampfverbrauch in t/Monat , LU die Luftumwälzung in h^{-1} , HGT die Heizgradtage⁴ in $\text{°C} \cdot \text{d}$ und K den gebäudespezifischen Dampfgrundverbrauch in t/Monat .



Figur 8: Mit Luftumwälzung normalisierter Heizdampfverbrauch vs. Heizgradtage⁶

Es zeigt sich somit, dass die Luftumwälzung, im Gegensatz zur Abstrahlung der Apparaturen oder der absoluten Grösse eines Betriebes (sehr unterschiedliche Grösse der untersuchten Gebäude) den hauptsächlichsten Einfluss auf die Heizdampfverbrauchscharakteristik eines Mehrprodukte-Mehrzweck-Batch-Betriebes hat.

⁵ Lüftungsvolumen in m^3/h dividiert durch das belüftete Gebäudevolumen in m^3

⁶ Bei den Regressionen bezeichnet x die Heizgradtage pro Monat und der Achsenabschnitt entspricht der Konstanten aus Gleichung (3) dividiert durch die Luftumwälzung in h^{-1}

Netzverluste

Da das Heizdampfnetz während der Sommermonate abgeschaltet wird (Schliessen einer Absperrklappe beim Gebäudeeingang), ist bei eingestellter Heizung praktisch kein Netzverlust im Gebäude vorhanden. Wie sich im vorhergehenden Kapitel zeigte, sind die Netzverluste während des Betriebes der Dampfnetze relativ klein, was auch beim Heizdampfnetz der Fall sein dürfte.

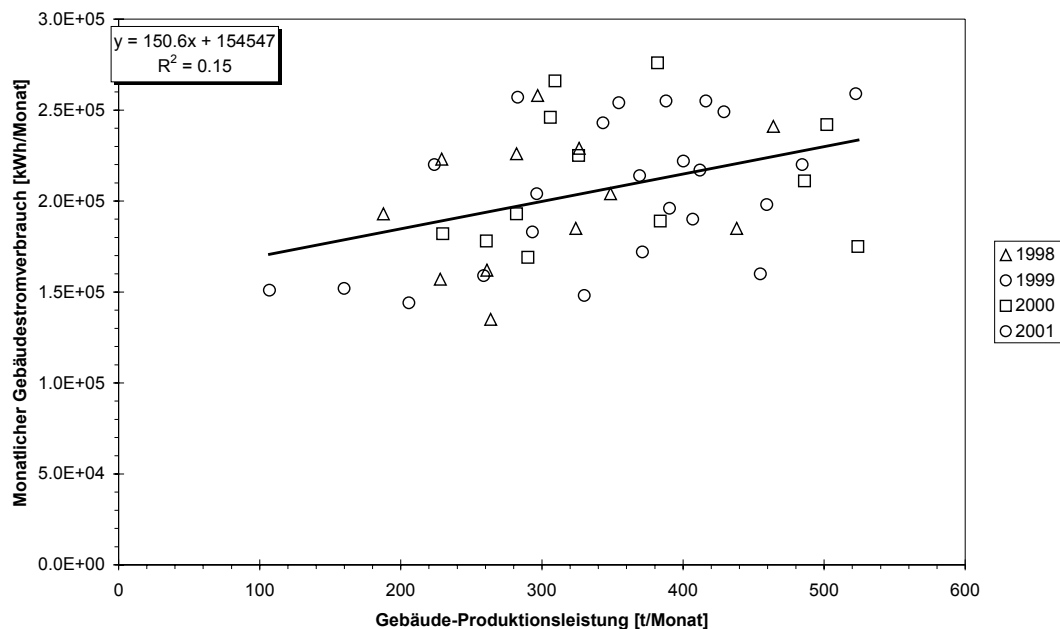
5.2.3 Elektrizität

Der Strom wird auf zwei Spannungsniveaus geliefert und benötigt: 400 V und 500 V. Messstellen existieren für beide Spannungsniveaus, die Abrechnungen auf Monatsbasis werden jedoch meist ausschliesslich als Summenstromverbrauch der Gebäude aufgelistet.

Wie beim Produktionsdampf wurde auch beim Strom versucht, Infrastrukturanlagen vom Gesamtverbrauch abzutrennen. Es wurden ebenfalls Zusammenhänge auf Tages- und Stundenbasis, sowie auf Apparatebelegungsstunden bezogen untersucht.

Verschiedene Detaillierungsebenen

Figur 9 zeigt den Kraftstromverbrauch (Produktionsstromverbrauch) des Gebäudes 1 der Jahre 1998 bis 2001. Es ist zu erkennen, dass keine Korrelation zwischen Produktionsmenge und Stromverbrauch möglich ist und sich somit kein Modell auf dieser Abstraktionsebene bilden lässt. Dies bedeutet, dass die Produktionsprozesse auch in Bezug auf den Stromverbrauch sehr unterschiedlich sind.

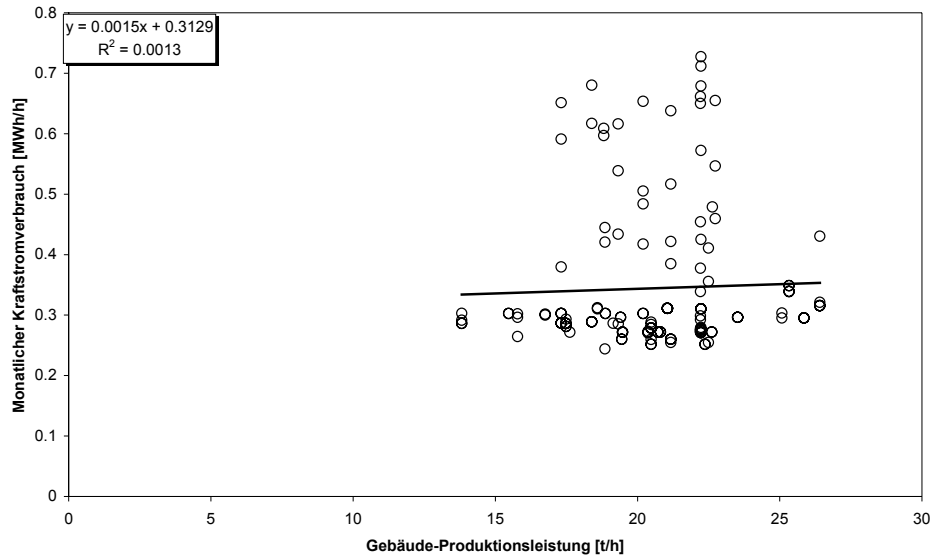


Figur 9: Kraftstromverbrauch pro Monat des Gebäudes 1

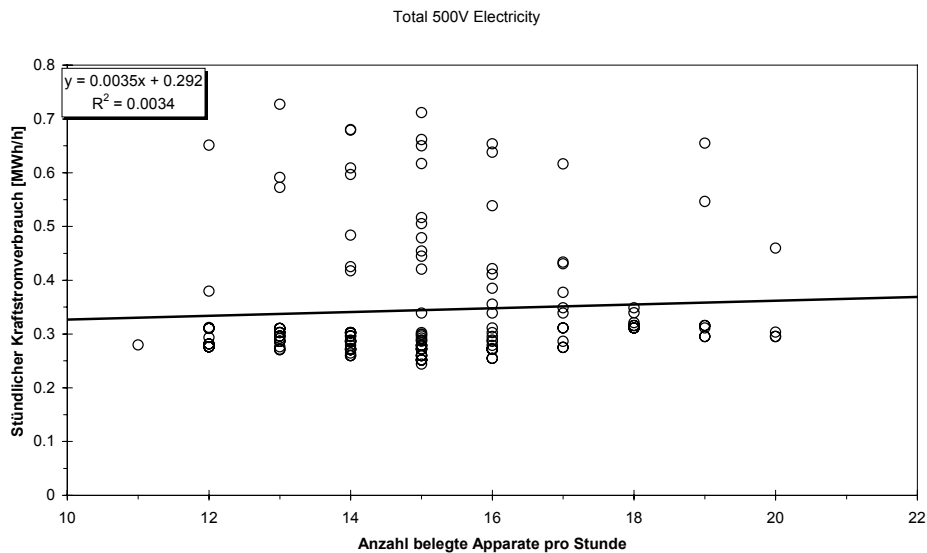
Ein detaillierteres Bild des Kraftstromverbrauches ist aus Figur 10 ersichtlich. Hier wurde ausschliesslich der 500 V Stromverbrauch aufgelistet, da sämtliche 400 V Apparaturen für Infrastrukturzwecke benötigt werden. Auch auf dieser (genaueren) Analyseebene konnte kein Zusammenhang zwischen Stromverbrauch und produzierten Tonnen gefunden werden. Dies deutet erneut auf die grossen Unterschiede in

den einzelnen Produktionsprozessen (unterschiedliche Reaktionszeiten (Rührwerksbetrieb), unterschiedliche Pumpzyklen etc.) hin.

Es stellte sich nun erneut die Frage, ob ein Zusammenhang zwischen aktiven Apparaten (Zeit, während denen ein Apparate im Produktionsprozess eingespannt ist) und dem Stromverbrauch ergibt (Rührwerke und Umwälzpumpen laufen meist während der ganzen Zeit, während der ein Reaktor gefüllt ist). Eine exemplarische Untersuchung hierzu ist in Figur 10 dargestellt. Es zeigt sich wiederum, dass die Abstraktionsebene auf Gesamtgebäudeebene zu grob ist, um aussagefähige Modelle für Mehrprodukte-Mehrzweck-Batch-Betriebe entwickeln zu können. Die laufenden Prozesse sind zu unterschiedlich in ihrem Verhalten, als dass eine Zusammenfassung auf laufende Apparate (nur die tatsächlich Elektrizität benötigenden Apparaturen wurden erfasst) eine Möglichkeit zur Analyse bilden würde.



Figur 10: 500 V Stromverbrauch pro Stunde im Gebäude 1

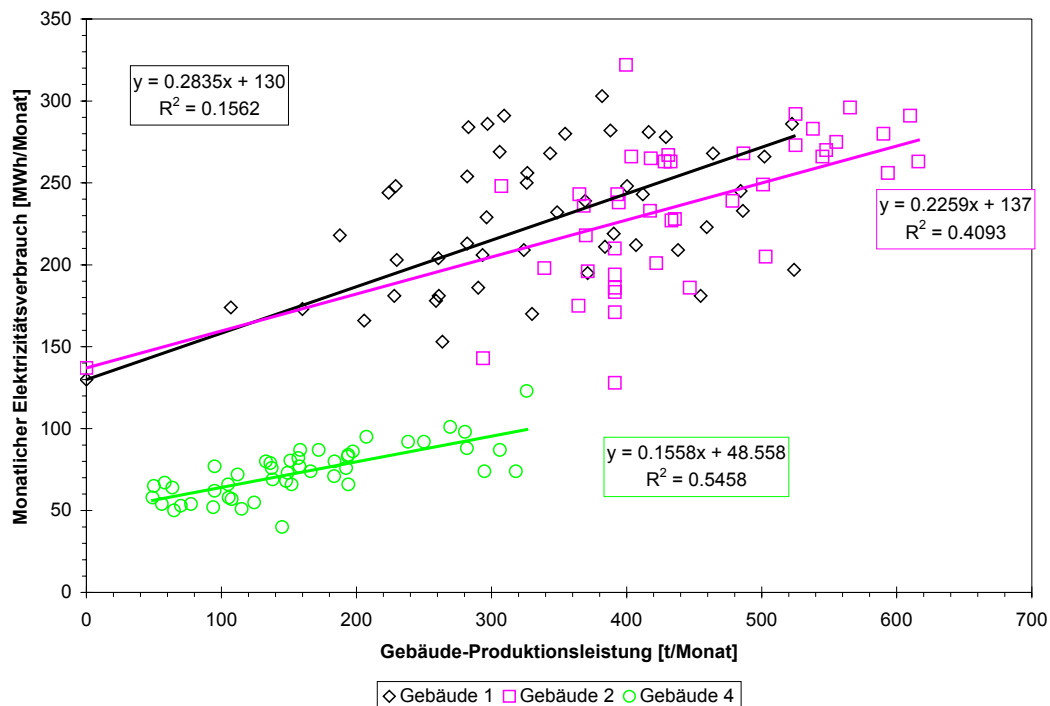


Figur 11: 500 V Stromverbrauch pro Stunde vs. belegte Apparate im Gebäude 1

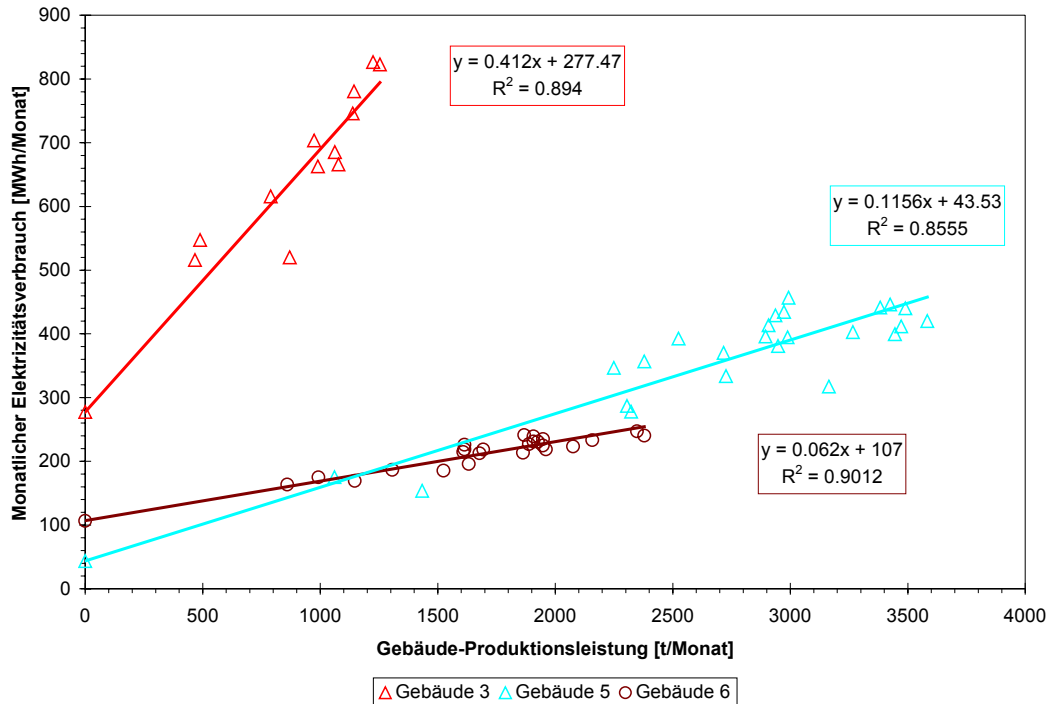
Vergleich der untersuchten Gebäude

Der totale monatliche Stromverbrauch der verschiedenen Gebäude ist in Figur 12 mit der Produktemenge in Beziehung gesetzt und soll im Folgenden kurz diskutiert werden. Da Kühlmedien (Sole resp. Eis) nur teilweise intern produziert wurden und der externe Stromverbrauch zu deren Produktion nicht klar nachvollzogen werden konnte (siehe Kapitel 5.2.4), wurden die Elektrizitätsverbräuche der Gebäude exklusiv des Verbrauches zur Kühlmedienproduktion betrachtet.

Die Mehrzweckbetriebe Gebäude 1 und 2 sind bezüglich ihres Grundverbrauches trotz der signifikanten Grössenunterschiede sehr ähnlich. Dies kann teilweise damit zusammenhängen, dass im Gebäude 1 die Produkte intern getrocknet werden und deshalb mehr Vakuumsysteme etc. benötigt werden. Die starke Streuung der Messwerte lässt keine klare Aussage bezüglich einer Korrelation zwischen Elektrizitätsverbrauch und Produktemenge zu. Hier muss eher von einem durchschnittlichen Elektrizitätsverbrauch während der Produktion gesprochen werden, denn von einer Korrelation. Dies dürfte einerseits durch die stark schwankende Produktemixzusammensetzung erklärbar sein. Andererseits bedingt die Flexibilität des Betriebes teilweise Wartezeiten zwischen verschiedenen Einheitsoperationen, was ebenfalls zur Streuung beiträgt. Ein Modell zur Berechnung des Stromverbrauches lässt sich somit für diesen Gebäudetyp auf dieser Abstraktionsebene nicht entwickeln und muss auf spätere Untersuchungen auf Apparateebene verschoben werden.



Figur 12: Vergleich des Stromverbrauches der untersuchten Gebäude (exklusiv Strom zur Kühlmedienproduktion)



Figur 12 (Forts.): Vergleich des Stromverbrauches der untersuchten Gebäude (exklusiv Strom zur Kühlmedienproduktion)

Gänzlich unterschiedlich zeigt sich das Bild bei den anderen untersuchten Gebäuden. Der Mehrzweckbetrieb welcher ausschliesslich Produkte einer Familie herstellt (Gebäude 3) zeigt eine klare Abhängigkeit des Stromverbrauches von der Produktemenge. Die einzelnen Produktionsverfahren sind relativ ähnlich, was sich in einer guten Korrelation und einer Möglichkeit des Modellaufbaus gemäss Gleichung (4) niederschlägt (vgl. [5]).

$$EV = K * CM + C \quad (4)$$

Hierbei bezeichnet EV den Elektrizitätsverbrauch in kWh, K ist der spezifische Elektrizitätsverbrauch in kWh pro t Produkt, CM ist die Menge an produzierten Produkten in t und C bezeichnet den Grundverbrauch des Gebäudes in kWh.

Bezüglich ihres Elektrizitätsverbrauches pro Tonne Produkt scheinen Gebäude 2 und 5 sehr ähnlich zu sein. Eine klare Aussage kann jedoch aufgrund des niedrigen Korrelationskoeffizienten bei Gebäude 2 nicht gemacht werden.

Gebäude 4 zeigt wiederum eine etwas schlechtere Korrelation als Gebäude 3, 5 und 6 und einen geringeren Grundverbrauchsterm als Gebäude 1, 2, 3 und 6. Der geringere Grundverbrauchsterm deutet darauf hin, dass für einen Trocknungsbetrieb weniger Infrastrukturanlagen, als für einen Produktionsbetrieb benötigt werden. Unterschiede im Trocknungsverhalten der Produkte (längeres oder kürzeres Trocknen) vermindern jedoch die Korrelation zwischen Produktemenge und Elektrizitätsverbrauch, wenn das Modell ausschliesslich auf die totale Produktemenge abgestellt wird.

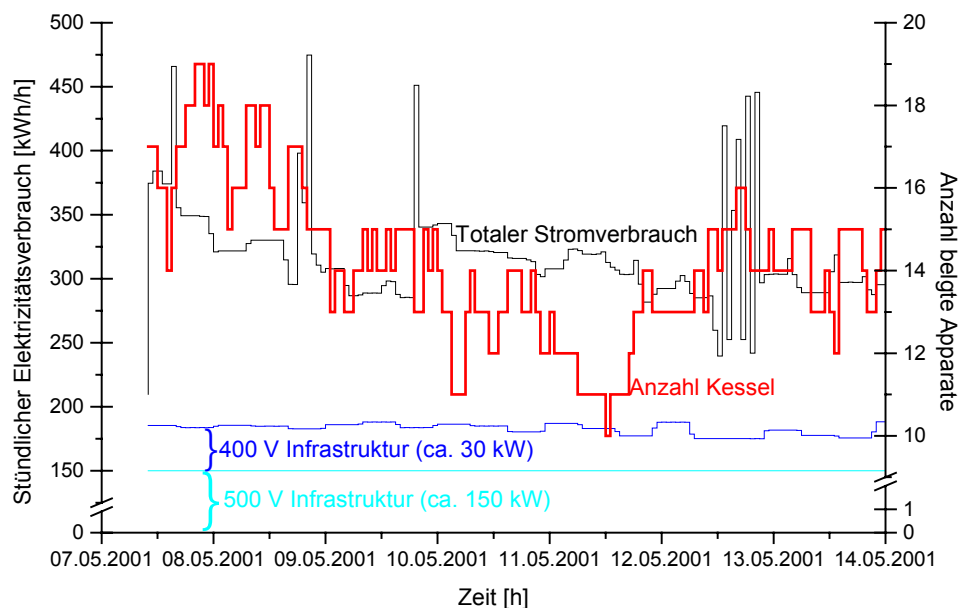
Der Grundverbrauch von Gebäude 5 ist im Vergleich zu den anderen Gebäuden sehr niedrig. Dies mag mit der klaren Ausrichtung des Betriebes auf einige wenige Produkte (bei der Planung des Gebäudes waren die Anforderungen an die Gerät-

schaften (insbesondere an die Infrastrukturanlagen) genau bekannt, wodurch die Anlagen nicht überdimensioniert wurden) zusammenhängen. Die gute Korrelation deutet auf die Konstanz des Produktemixes hin. Die in diesem Gebäude ablaufenden Produktionsprozesse weisen einen kleinen spezifischen Stromverbrauch auf als diejenigen der anderen Gebäude (geringe Wartezeiten, effiziente Rührwerke), wie die geringere Steigung der Regressionsgeraden zeigt.

Gebäude 6 ist ein Beispiel für einen hoch automatisierten Betrieb. Der Grundverbrauch ist (im Vergleich zum Produktionsverbrauch) hoch. Dies widerspiegelt die hoch automatisierten Anlagen, mit welchen menschliche Arbeitskraft durch elektrische Automation ersetzt wurde. Die sehr gute Korrelation ist durch die absolute Uniformität des Produktespektrums (das Gebäude wurde für ein einziges Produkt gebaut und auch nur dieses wird darin hergestellt) erklärbar.

Grundverbrauch des Gebäudes 1

Der Grundverbrauch des Gebäudes 1 wurde in zwei Weisen aufgenommen. Einerseits konnte der 400 V Stromverbrauch (ausschliesslich Infrastruktur-Anlagen) via einen fest installierten Messzähler gemessen werden. Andererseits wurden die am 500 V Netz hängenden Infrastrukturanlagen (z.B. Zuluftventilatoren) mittels eines portablen Strommessgerätes mehrfach gemessen. Diese Einzelmessungen (Momentaufnahmen) zeigten nur kleine Schwankungen, womit der Verbrauch als über die Zeit konstant angenommen wurde. Diskussionen mit Betriebsverantwortlichen erhärteten diese Annahme. In Figur 13 ist der totale Stromverbrauch (500 V und 400 V) des Gebäudes 1 für eine repräsentative Woche aufgetragen.



Figur 13: Verlauf des Grundverbrauchs des Kraftstromes des Gebäudes 1 (Woche 19; 2001)

Es ist klar zu erkennen, dass der Infrastrukturverbrauch einen signifikanten Anteil am Gesamtstromverbrauch des Gebäudes hat (ca. 50 %).

Weiters ist erneut zu erkennen, dass keine klare Korrelation zwischen der Anzahl laufender Apparate und dem absoluten Stromverbrauch besteht (vgl. z.B. Abnahme

der Anzahl laufender Apparate am 11.05.2001 im Vergleich zum gleichbleibenden, resp. leicht steigenden Stromverbrauch).

5.2.4 Sole

Für die Messungen des Kühlenergieverbrauches (zumeist Sole) existiert je Gebäude nur eine einzige Messstelle. Die Gebäude 1 und 2 besitzen eine externe Soleversorgung. Hierbei wird die Sole zentral hergestellt und via ein Leitungsnetz den Bezüglern zu Verfügung gestellt. Der tatsächliche Verbrauch wird durch Temperaturdifferenz und Durchfluss an der Gebäudegrenze gemäss Gleichung (5) berechnet [15]. Proportional dieser berechneten Kälteleistung wird sodann der Stromverbrauch der zentralen Kälteanlagen aufgeteilt und den Bezüglern in Rechnung gestellt.

$$SV = m * c_p * \Delta T * 3600 \quad (5)$$

In dieser Gleichung benennt SV den Soleverbrauch in kWh/h, m den Massendurchfluss in kg/h, c_p die Wärmekapazität der Sole in kJ/kg K und ΔT den Temperaturunterschied zwischen Ein- und Ausgang in K. 3600 s/h wird als Umrechnungsfaktor benötigt.

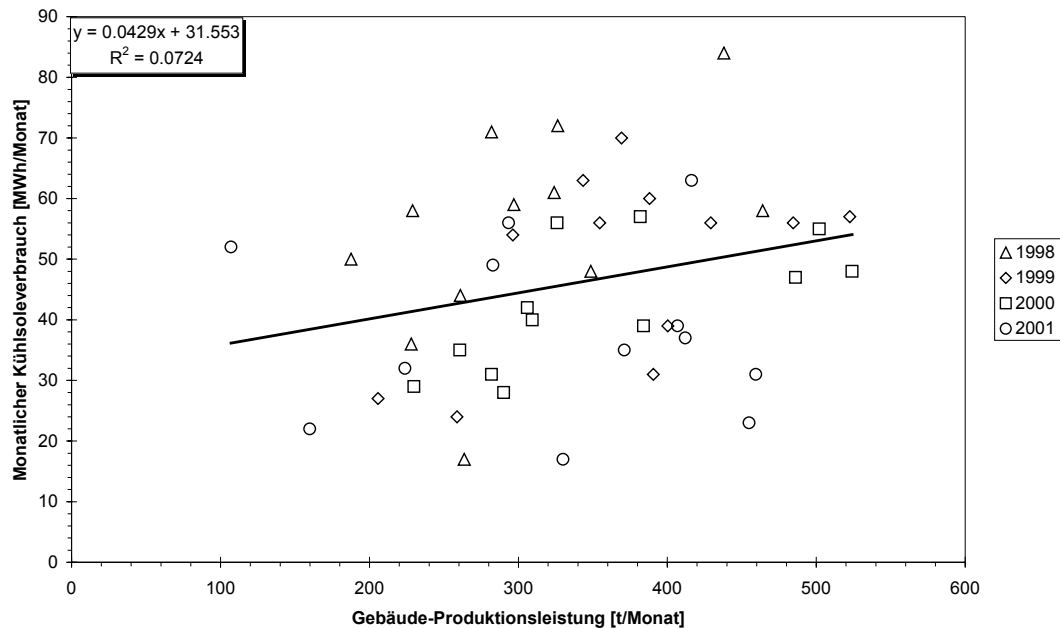
In Gebäude 3 wird keine Sole verwendet, sondern die Reaktionen werden direkt mit Eis gekühlt (da Wasser ohnehin als Lösungsmittel Verwendung findet). Zwei eigene Eismaschinen stehen im Gebäude zur Verfügung.

Gebäude 4 ist, wie Tabelle 1 zeigt, ein Trocknungsbetrieb. Dieser Betrieb benötigt für die Produktion keine Sole und nur sehr wenig Eis. Aus diesem Grunde wurde die Betrachtung des Kältemedienverbrauches für diesen Betrieb nicht durchgeführt.

In sämtlichen Gebäuden ausser Gebäude 3 wurde der Eisverbrauch vernachlässigt, da es sich nur um geringe Mengen handelte.

Verschiedene Detaillierungsebenen

In Figur 14 ist der monatliche Kühlsoleverbrauch im Gebäude 1 über vier Jahre hinweg aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass sich, wie bereits beim Dampf- und beim Elektrizitätsverbrauch, kein Modell auf Monatsbasis und Gebäudeebene über die Produktmenge bilden lässt. Die Produkte sind zu unterschiedlich (zudem benötigen nicht alle Produkte Solekühlung während ihres Produktionsprozesses), als dass sich auf dieser Abstraktionsebene ein brauchbares Modell entwickeln liesse.

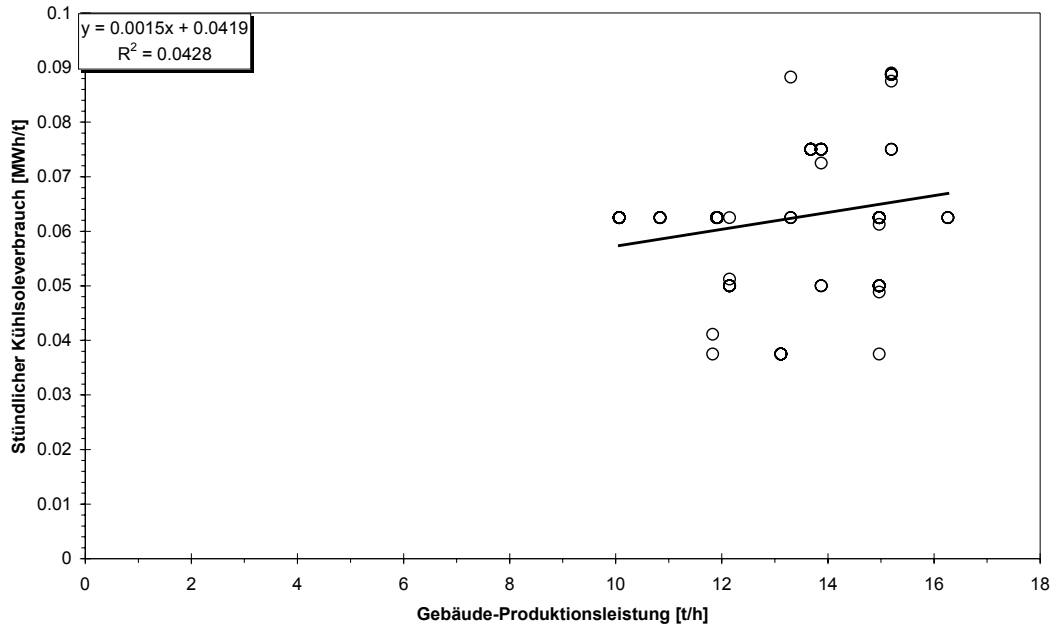


Figur 14: Monatlicher Kühlsoleverbrauch vs. Produktionsleistung im Gebäude 1

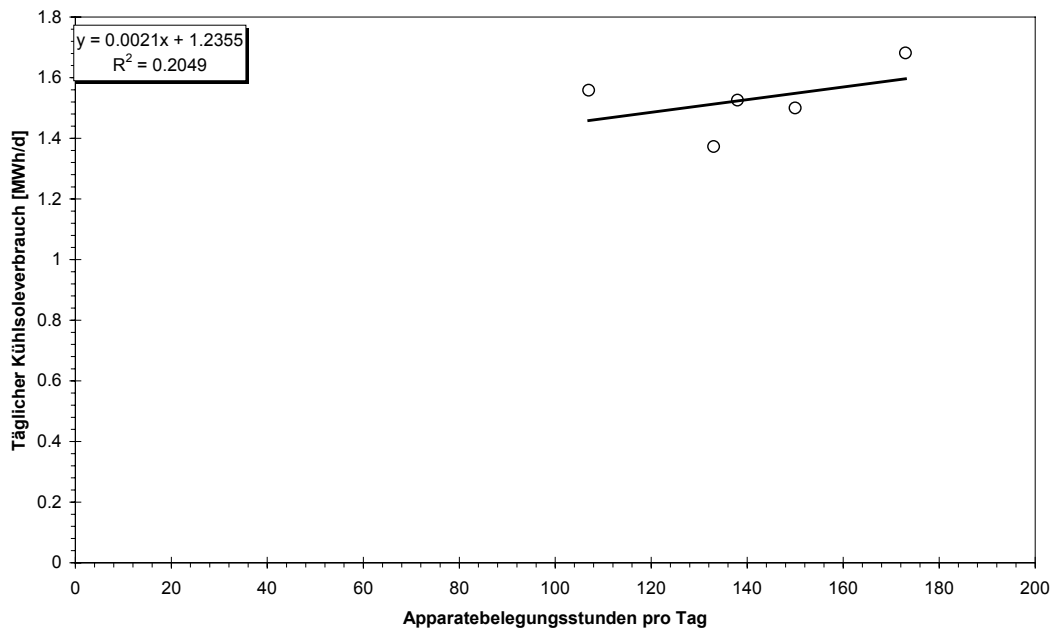
Der stündliche Kühlsoleverbrauch für die Woche 19 des Jahres 2001 ist in Figur 15 ersichtlich. Auch hier zeigte sich, dass keine Korrelation mit der Produktmenge möglich war. Dies trotzdem ausschliesslich diejenigen Produkte, welche Sole während des Produktionsprozesses benötigten, berücksichtigt wurden. Sogar mit dieser detaillierten Auflösung sind die einzelnen Produktionsprozesse zu unterschiedlich, als dass sich genaue Aussagen treffen liessen.

Ein ähnliches Bild zeigte sich, wenn der tägliche Kühlsoleverbrauch mit den Apparatebelegungsstunden in Zusammenhang gebracht werden sollte, wie Figur 16 zeigt. Auch hier wurden nur die soleverbrauchenden Apparate berücksichtigt. Trotzdem ergab sich keine genügende Korrelation. Dies lässt darauf schliessen, dass auch unter den solebeziehenden Produktionsprozessen so grosse Unterschiede herrschen, dass eine Zusammenfassung nicht möglich ist.

Eine Modellbildung auf genereller Gebäude- oder Produkteebene ist somit nicht möglich und es werden genauere Modelle auf der Ebene von Einheitsoperationen benötigt.



Figur 15: Stündlicher Kühlsoleverbrauch vs. Produkte in Arbeit für Gebäude 1 (Woche 19; 2001)



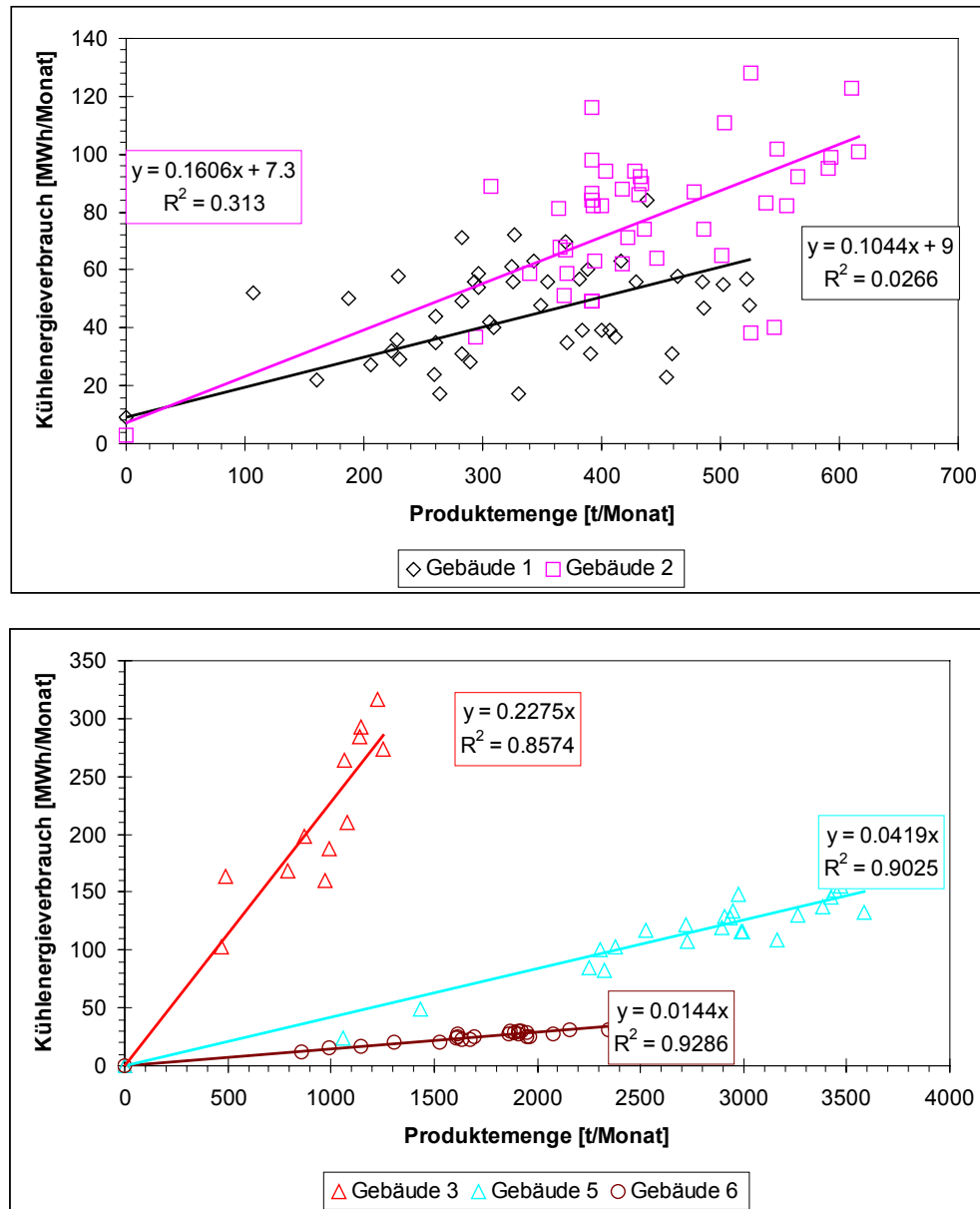
Figur 16: Täglicher Kühlsoleverbrauch vs. Apparatebelegungsstunden im Gebäude 1 (Woche 19; 2001)

Vergleich der untersuchten Gebäude

Ein Vergleich des Kühlleistungsbedarfes der verschiedenen Gebäude ist in Figur 17 dargestellt. Das Gebäude 4 wurde nicht aufgeführt, da ausschliesslich Eis von einer externen Produktionseinheit bezogen wurde, Energieverbrauch für die Eisproduktion nicht bekannt war und zudem nur sehr wenig Eis benutzt wurde.

Bei Gebäude 3 wurde der Elektrizitätsbedarf für zwei interne Eismaschinen untersucht, Sole wurde in diesem Gebäude keine verwendet (wässrige Chemie mit direkter Eiskühlung).

Bei den übrigen Gebäuden wurde der Elektrizitätsverbrauch zur externen (Gebäude 1 und 2) oder internen (Gebäude 5 und 6) Kühlsoleproduktion aufgetragen. Der geringe Eisverbrauch dieser Gebäude wurde in der Betrachtung vernachlässigt.



Figur 17: Vergleich des monatlichen Kühlmedienverbrauches der verschiedenen Gebäude

Aus Figur 17 ist zu erkennen, dass der Grundverbrauch der einzelnen Gebäude klein und bei interner Produktion sogar kaum nachweisbar ist. Die starke Produktabhängigkeit ist aus den einzelnen Steigungen zu erkennen. Bei gegebenem Produktmix ist der Kühlbedarf klar durch die produzierte Tonnage gegeben (vgl. die sehr gute Korrelation bei den Gebäuden 3, 5 und 6), wohingegen bei stark schwankender Produktezusammensetzung, wie bereits beim Elektrizitätsbedarf (vgl. Figur 12) beobachtet, kaum eine Korrelation zwischen Tonnage und Kühlbedarf zu finden ist (Gebäude 1 und 2), da die einzelnen Produkte hier zu unterschiedlich sind (nicht alle Produkte benötigten Kühlung).

Grundverbrauch des Gebäudes 1

Wie in Figur 1 dargestellt, wurde das Gebäude 1 durch einen externen Lieferanten via einen Wärmetauscher mit Kälte versorgt. Der Lieferant produzierte zentral Sole (Ethylenglykol-Wasser-Gemisch), welche die im Gebäude 1 Verwendung findende Salzsole (Calciumchlorid-Wasser-Gemisch) über einen Plattenwärmetauscher abkühlte. Primär wurde immer die auf Werkssoleseite bezogene Kälteleistung vom Lieferanten gemessen (analog Gleichung (5)) und mit dem Stromverbrauch der Kälteanlagen verrechnet. Der Solegrundverbrauch des Gebäudes 1 wurde sowohl auf der Werkssoleseite, als auch beim internen Kreislauf gemessen. Beim externen Kreislauf wurden die Werte durch die externe Firma gemessen und der anteilmässige Stromverbrauch der Kälteanlagen zur Verfügung gestellt. Intern wurde der Durchfluss und die Ein- und Austrittstemperaturen gemessen. Dies ermöglichte die Berechnung des Kältebedarfes gemäss Gleichung (5).

Auf der externen Seite wurde ein zwischen 0 kWh/h und ca. 13 kWh/h schwankender Grundverbrauch gemessen. Die interne Messung (Durchfluss wurde mittels eines Ultraschall-Durchflussmessgerätes gemessen) ergab einen Grundverbrauch von ca. 18 kWh/h. Da für die Produktion einer kWh Kälteleistung in einer Kältemaschine eine elektrische Leistung von weniger als einer kWh nötig ist (siehe z.B. [16]), sind diese Werte durchaus plausibel und zeigen, dass der Grundverbrauch bei externer Produktion ca. 10 bis 20 % des Kältebedarfes ausmacht.

5.3 Analyse einzelner Apparate

In den folgenden Unterkapiteln wird kurz dargelegt, welche Messungen auf Apparateebene bereits durchgeführt wurden und wie Modelle zur Berechnung des Energiebedarfes einzelner Einheitsoperationen aufgebaut und überprüft werden konnten. Die Modelle berechnen jeweils den totalen Energiebedarf einer einzelnen Energie (Strom, Dampf oder Sole) einer Einheitsoperation. Es wurde darauf geachtet, dass die gebildeten Modelle einfach an veränderte Reaktionsbedingungen oder Apparatemodelle anpassbar waren. Zudem wurden die Modelle einfach genug gehalten (d.h., dass die Modelle so wenige substanz- und apparatespezifische Daten wie möglich enthalten), um im täglichen Arbeitsalltag eines chemischen Produktionsbetriebes Verwendung finden zu können.

5.3.1 Beschreibung der Messungen

Dampfmessungen

Die Dampfmessungen wurden mit einer mobilen Dampfmesstation durchgeführt, welche mittels Flanschverbindungen an Dampfleitungen angeschlossen werden konnte und den Dampfdurchfluss mit Hilfe von zwei Wirbelstromdurchflussmessungen bestimmte. Die Messgenauigkeit dieser Dampfmesstation wurde mittels ei-

nes beheizten Linsenfilters wie folgt überprüft: Das Gerät wurde vor dem Linsenfilter an der Dampfleitung angeschlossen, das Kondensat wurde nach dem Linsenfilter in einem Fass aufgefangen und die Menge nach beendetem Messvorgang mittels einer Waage bestimmt. Die Ergebnisse dieses Tests sind in Tabelle 2 aufgeführt. Bei der Abweichung ist zu beachten, dass das Fass zum Kondensatauffang nicht geschlossen war und somit etwas Flüssigkeit verdunsten konnte. In Anbetracht der geringen Mengen (sehr geringer Fluss in kg/h, höhere Genauigkeit bei grösseren Durchflüssen), wurde davon ausgegangen, dass die mobile Dampfmesstation sehr genau funktioniert und den gemessenen Werten somit vertraut werden kann.

Tabelle 2: Test der mobilen Dampfmesstation

Versuch Nr.	An der Anzeige Totale-Menge	Kondensat im 200 l Fass (Netto)	Abweichung
1	51.7 kg	47.1 kg	~ 9 %
2	116.8 kg	102 kg	~ 13 %
3	82.6 kg	77.2 kg	~ 6 %

Elektrische Leistungsmessungen

Für die Messung der elektrischen Leistung, wurden die Stromaufnahmen (in A) gemessen. Mit Hilfe des bekannten Spannungsniveaus von 500 V (resp. 400 V für spezielle Apparaturen) konnte mittels Gleichung (6) die Aufnahme der Apparate in kW berechnet werden [17]. Der interne Wirkungsgrad der Motoren ($\cos \varphi$) wurde hierbei mit 0.85 angenähert (Mittelwert, der von Fachleuten als adäquat bezeichnet wurde).

$$P = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot U \cdot \cos \varphi}{1000} \quad (6)$$

Hierbei bezeichnet P die gesamte Leistung in kW, I der Strom in A und U die Spannung in V.

Solemessungen

Die Solemessungen an den Apparaten wurden mit Hilfe eines Ultraschalldurchflussmessgerätes und zweier Temperaturfühler, welche die Eintritts- und Austrittstemperaturen der Sole messen, durchgeführt (Berechnung analog Gleichung (5)).

5.3.2 Vakuum Schaufeltrockner

An zwei verschiedenen Schaufeltrocknern⁷ im Gebäude 4 wurden Dampfmesungen bei je zwei verschiedenen zu trocknenden Produkten durchgeführt. Anhand dieser Messungen wurde ein Modell für den Dampfverbrauch eines Schaufeltrockners entwickelt und getestet.

Das zugrunde gelegte allgemeine Modell ist in Gleichung (7) dargestellt. Die erste Klammer enthält produkteabhängige Terme (Aufheizen des Produktes, des Lösungsmittels und Verdampfen des Lösungsmittels), die zweite Klammer enthält Terme, welche die Apparatur beschreiben (Aufheizen des Heizsystems (Wasserinhalt des Heizsystems), sowie Aufheizen des Apparates (Stahl)). Die letzte Klammer enthält schliesslich einen Verlustterm, welcher proportional zur Temperaturdifferenz zwi-

⁷ Vakuum Schaufeltrockner mit beheizter Rührwelle von zwei unterschiedlichen Herstellern

schen Innen- und Aussentemperatur ist, sowie einen Term für den Wärmeeintrag über den Rührer. Diese letzten Terme sind zeitabhängig (je länger eine Apparatur in Gebrauch ist, desto grösser ist der Verlust).

$$DV = \frac{(c_{P_P} \cdot M_P \cdot \Delta T_P + c_{P_{LM}} \cdot M_{LM} \cdot \Delta T_{LM} + \Delta H_{V_{LM}} \cdot M_{LM}) + (c_{P_H} \cdot M_H \cdot \Delta T_H + c_{P_S} \cdot M_S \cdot \Delta T_S) + (K \cdot \Delta T - R) \cdot t}{\Delta H_{V_D}} \quad (7)$$

In dieser Gleichung bezeichnet DV den Dampfverbrauch in kg, c_P die Wärmekapazitäten in kJ/kg K, M die Massen in kg, ΔT die Temperaturunterschiede zwischen Raumtemperatur und Trocknungstemperatur in K, ΔH_V die Verdampfungsenthalpie in kJ/kg, K die Abstrahlungsverluste in kJ/K h, R den Eintrag durch Motoren (Rührwerk, Umwälzpumpe) in kJ/h und t die Operationszeit in h.

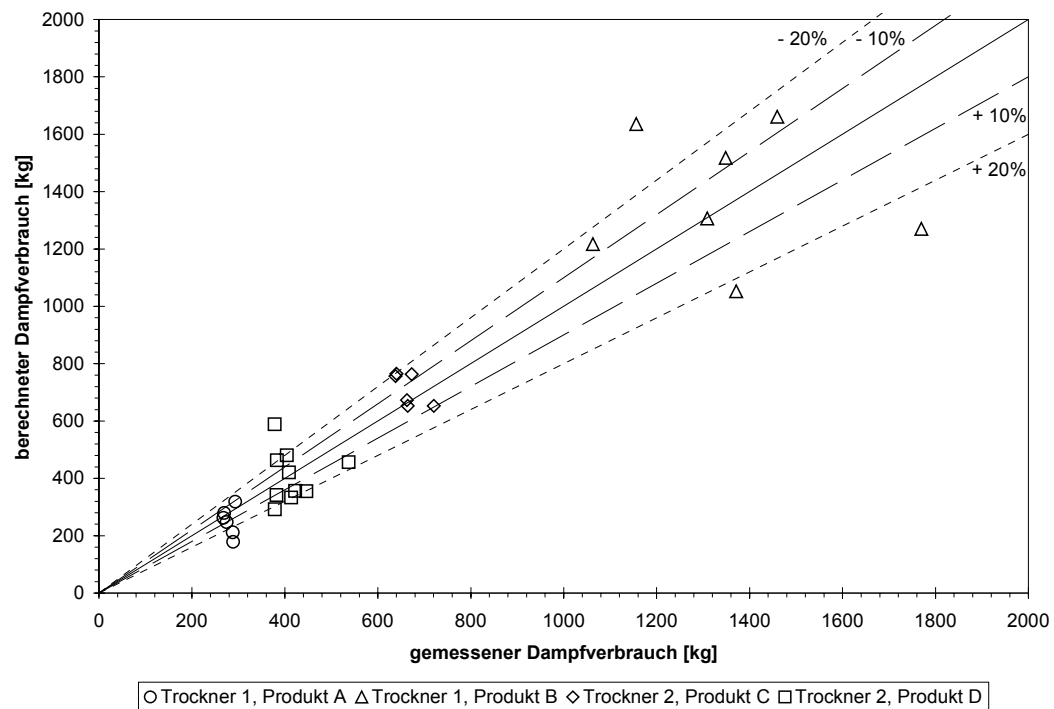
Der letzte (zeitabhängige) Term von Gleichung (7) erlaubt eine Anpassung des Modelles an die gemessenen Daten. Sämtliche restlichen Terme der Gleichung sind durch die ausgewählte Apparatur und die Menge und Art an Feuchtprodukt gegeben.

Figur 18 zeigt einen Vergleich des berechneten und des gemessenen Dampfverbrauches für einen der beiden untersuchten Schaufeltrockner. Für diesen Trocknertyp wurde angenommen, dass nur ca. 50 % des gesamten Apparatematerials tatsächlich auf die Endtemperatur aufgeheizt werden, was aufgrund der Anordnung der Heitzaschen und der Aufbauten als plausibel erachtet wurde. Es wurde angenommen, dass der maximale Wärmeeintrag durch den Rührer und die Umwälzpumpe des Heizsystems der Wirkleistung der Motoren entsprach. Diese Motorleistungen wurden durch Strommessgeräte gemessen.

Aus Figur 18 ist ersichtlich, dass die Modellierung der Batches nicht immer mit der selben Genauigkeit möglich war, die Übereinstimmung zwischen Realität und Berechnung jedoch über alles gesehen als gut bezeichnet werden darf. Grössere Abweichungen sind einerseits auf Messungenauigkeiten zurückzuführen. Andererseits sind jedoch auch einige Ungenauigkeiten inhärent mit dem Modell verbunden. Hier ist speziell auf die Einfachheit des entwickelten Modelles hinzuweisen. Es wurde ein einfaches Modell gewählt, welches den gesamten Dampfverbrauch eines einzelnen Batches mit hinreichender Genauigkeit berechnet. Hierbei wurde darauf geachtet, dass nur Parameter verwendet wurden, welche für Produkte üblicherweise bekannt sind. Effekte wie z.B. Dampfdruckerniedrigung in Poren wurden nicht berücksichtigt (resp. im Verlustterm zusammengefasst). Diese können jedoch bei stark schwankenden Eingangsgrössen (wie z.B. sehr geringe Anfangsfeuchte) einen signifikanten Einfluss auf den Dampfverbrauch besitzen, was die Grenzen dieses einfachen Modelles aufzeigt. Zur genaueren Modellierung müssten signifikant komplexere Modelle verwendet werden (siehe z.B. [18]). Andererseits sind Daten über Korngrößenverteilungen, Oberflächenbeschaffenheit etc. (wie sie für diese Berechnungen benötigt würden) für die untersuchten Substanzen nicht bekannt und es ist auch nicht anzunehmen, dass diese in Zukunft in der chemischen Industrie standardmässig erfasst werden. Somit wären Modelle, welche diese Parameter benutzen, für die industrielle Anwendung, trotz womöglich grösserer Genauigkeit, nicht geeignet.

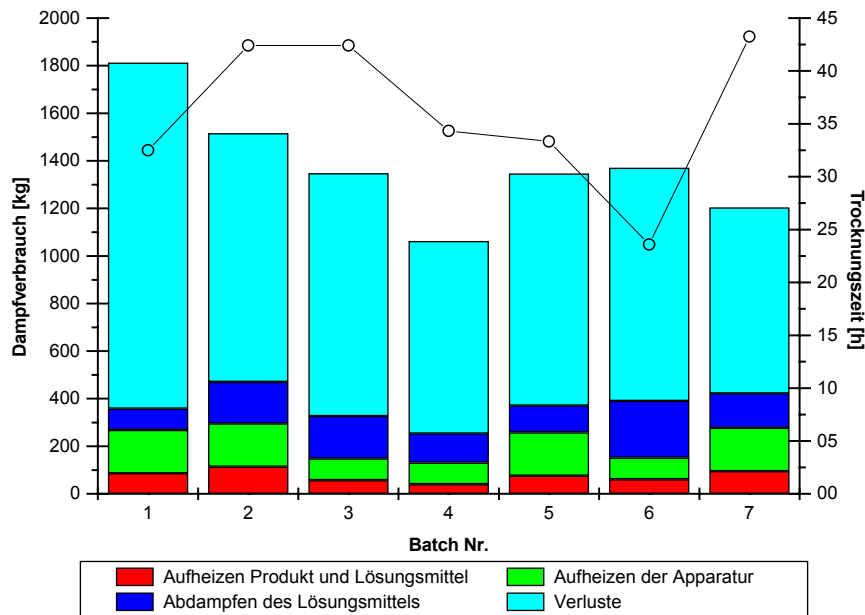
Stoffspezifische Werte wie Wärmekapazitäten sind für die in der chemischen Industrie Verwendung findenden Lösungsmittel relativ gut zugänglich (z.B. in [19]). Wärmekapazitäten für die Produkte sind jedoch nur in Ausnahmefällen zugänglich. Deshalb wurde auf die bekannten Wärmekapazitäten von analogen Produkten zurückgegriffen. Waren auch solche nicht zugänglich, wurde eine Wärmekapazität von 2 kJ/kg K angenommen, da die meisten Wärmekapazitäten von organischen Feststoffen diese Grössenordnung besitzen. Eine Sensitivitätsanalyse zeigte zudem,

dass die Wärmekapazität des Produktes nur einen geringen Einfluss auf die Modellierungsgenauigkeit besitzt.



Figur 18: Mit Gleichung (7) berechneter und gemessener Dampfverbrauch zweier verschiedener Schaufeltrockner

Der Verluste nehmen einen markanten Anteil des gemessenen Dampfverbrauches ein, wie Figur 19 zeigt (dies trotz des mit geschätzten 12 kW doch erheblichen Rührereintrages). Dies hängt sicherlich mit der beträchtlichen Trocknungszeit zusammen. Bei den Batches 1, 2, 5 und 7 wurde der Trocknungsvorgang zudem übers Wochenende unterbrochen, was einen doppelten Aufheizverbrauch zur Folge hatte.



Figur 19: Aufteilung des gemessenen Dampfverbrauches (Trockner 1, Produkt B)

Zusammenfassend darf das entwickelte Modell als für die Modellierung des Gesamtdampfverbrauches einer Trocknung in einem Schaufeltrockner geeignet bezeichnet werden.

5.3.3 Wärmekammer

Wärmekammern finden zum Aufschmelzen und Warmhalten von Feststoffen Verwendung. Die Feststoffe werden meist in Fässern in die Kammern gestellt und für mehrere Stunden bis mehrere Tage zum Aufschmelzen in den Kammern gelassen. Die Kammern werden mittels Dampf beheizt und besitzen einen kleinen Ventilator zur Luftumwälzung innerhalb der Kammern. Die Fässer werden somit durch die umgebende Luft beheizt (allg. schlechter Wärmeübergang Gas-Feststoff).

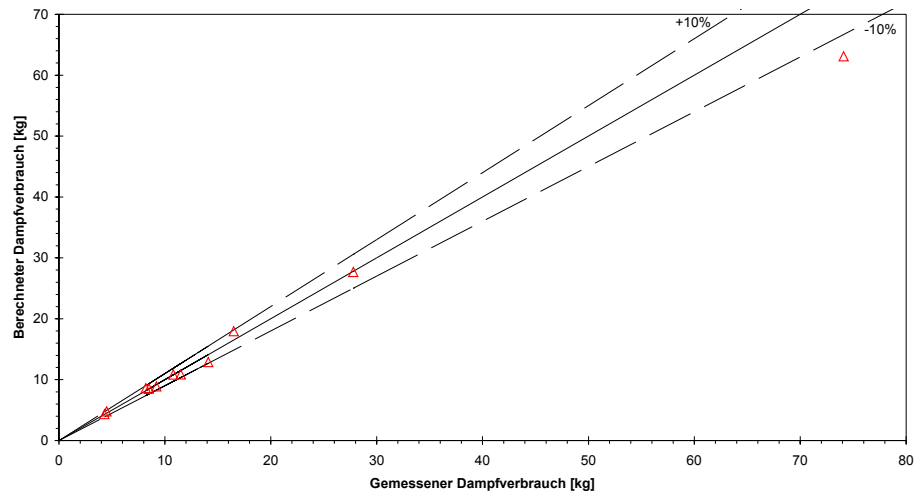
Das den Berechnungen zu Grunde gelegte Modell ist in Gleichung (8) dargestellt. Es wurde angenommen, dass keine Verdampfung eintritt, sondern ausschliesslich ein Aufschmelzen des Feststoffes stattfindet.

$$DV = \frac{(c_{P_p} \cdot M_p \cdot \Delta T_p + \Delta H_{M_p} \cdot M_p) + (c_{P_s} \cdot M_s \cdot \Delta T_s) + (K \cdot \Delta T) \cdot t}{\Delta H_{V_D}} \quad (8)$$

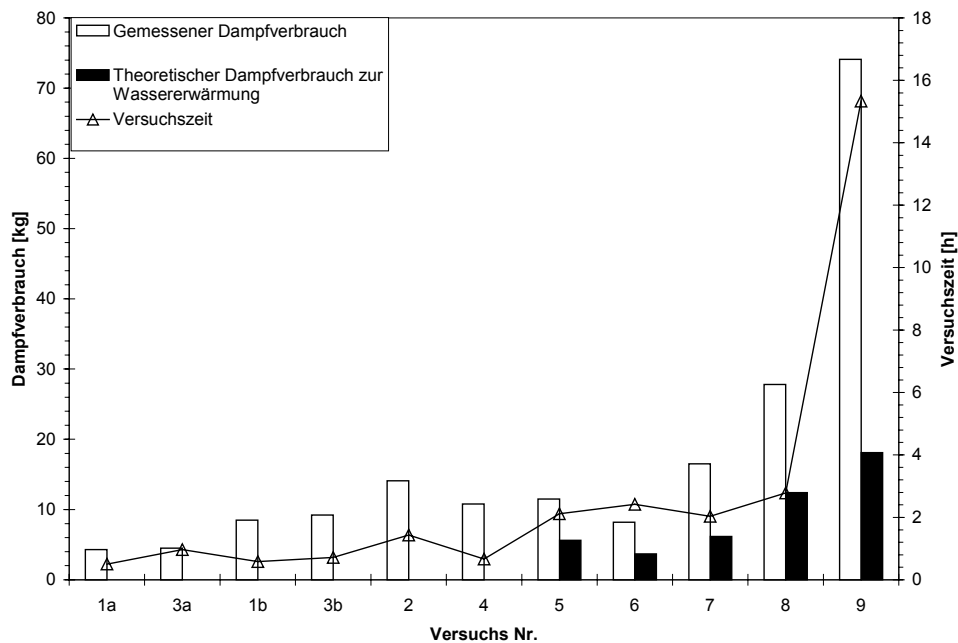
In dieser Gleichung steht DV für den Dampfverbrauch in kg, c_P für die Wärmekapazitäten in kJ/kg K, M für die Massen in kg, ΔT für die Temperaturunterschiede zwischen Anfangs- und Endzeitpunkt in K, ΔH_M für die Schmelzenthalpien in kJ/kg, K für die Abstrahlungsverluste in kJ/K h und t für die Operationszeit in h.

Die Tests und Messungen wurden einerseits mit einer nicht beschickten Wärmekammer (Versuche 1a bis 4) und andererseits mit der mit zwei Fässern mit je 150 l Wasser Inhalt beladenen Wärmekammer (Versuche 5 bis 9) durchgeführt. Die Aussentemperatur wurde mittels eines Kontaktthermometers gemessen. Die Wärmeaufnahme des Wassers wurde gemäss Gleichung (5) mit Hilfe der Anfangs- und

Endtemperaturen berechnet (Vernachlässigung der Wärmeaufnahme der Metallfässer). Das Modell wurde wiederum mit Hilfe des Verlusttermes (K) den gemessenen Dampfverbräuchen angepasst. Die Resultate sind in Figur 20 und Figur 21 ersichtlich.



Figur 20: Mit Gleichung (8) berechneter und gemessener Dampfverbrauch für eine Wärmekammer



Figur 21: Theoretischer Dampfverbrauch für Wassererwärmung, verglichen mit dem gemessenen Dampfverbrauch

Wie aus Figur 21 hervorgeht, sind die Verluste beim Arbeiten mit Wärmekammern erheblich. Die aufzuschmelzenden Fässer müssen aufgrund des schlechten Wärmeüberganges von Gas zu Feststoff sehr lange in den Kammern bleiben, wodurch auch die Wärmeverluste (proportional zur Zeit) stark ansteigen. Dies wird bei Batch 9 sehr deutlich. Trotz einer Verweilzeit von 15.3 h und einer Innentemperatur

von 75 °C konnte der Inhalt der beiden Fässer (je 150 l Wasser) nur von ca. 25 °C auf ca. 60 °C aufgeheizt werden.

Die Korrelation des Modelles mit der Realität (Figur 20) kann als sehr gut bezeichnet werden. Dies hängt mit der Einfachheit dieser Einheitsoperation zusammen, welche durch das sehr einfache Modell sehr genau beschrieben werden kann.

5.3.4 Rührwerksmotoren

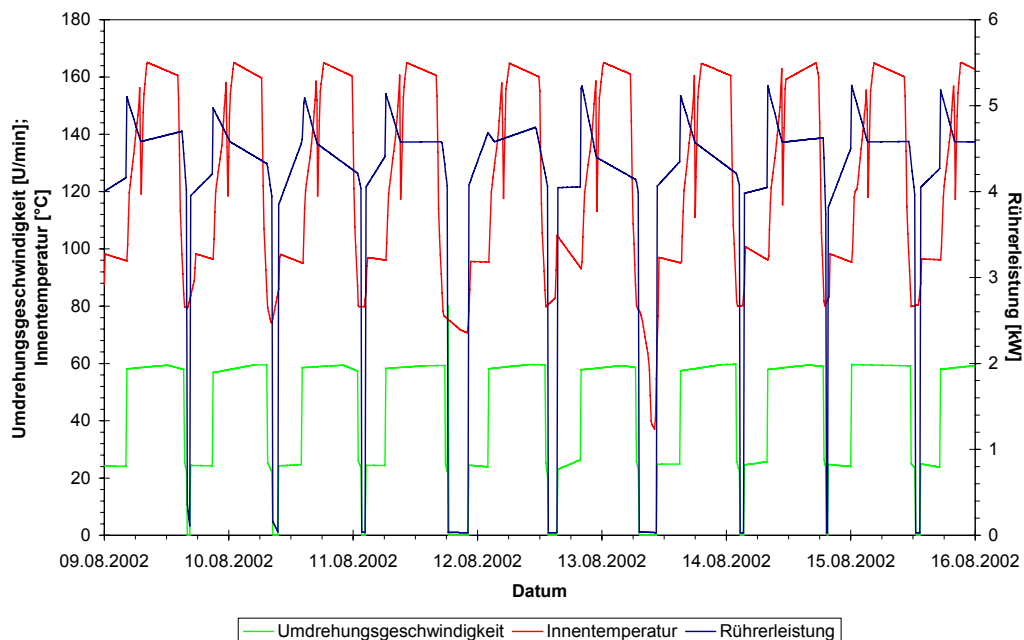
Messungen der Leistungsaufnahme diverser Rührwerksmotoren wurden bei verschiedenen Reaktionsbedingungen (Temperatur, Umdrehungszahl, Rührerform, etc.) durchgeführt. Ein Beispiel einer solchen Messung ist in Figur 22 dargestellt. Es ist anzumerken, dass sich die Rührcharakteristik bei den in chemischen Produktionsbetrieben durchgeführten Reaktionen und benutzten Rührerleistungen stets im turbulenten Bereich befindet⁸.

Bei der Analyse zeigte sich, dass die Rührleistung (blaue Kurve) kaum von der Umdrehungsgeschwindigkeit des Rührers (grüne Kurve) abhängt. Ebenfalls ist keine Abhängigkeit von der Viskosität des Reaktionsmediums erkennbar (Viskosität eng mit Temperaturverlauf gekoppelt). Dies steht im Gegensatz zu publizierten Studien, welche eine Abhängigkeit gemäss Gleichung (9) postulieren (siehe z.B. [20]).

$$P = Ne \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d^5 \quad (9)$$

P entspricht hier der Leistungsaufnahme in kW, Ne ist die Newton Zahl, ρ entspricht der Dichte des gerührten Mediums in kg/m^3 , n der Umdrehungszahl in U/min und d dem Durchmesser des Rührers in m.

Frühere interne Untersuchungen zeigten jedoch ebenfalls einen relativ konstanten Leistungsbezug, welcher bei ca. 60 % der Nennleistung gefunden wurde [21].



Figur 22: Leistungsaufnahme eines Rührers während Produktion in einem 6.3 m^3 Rührbehälter

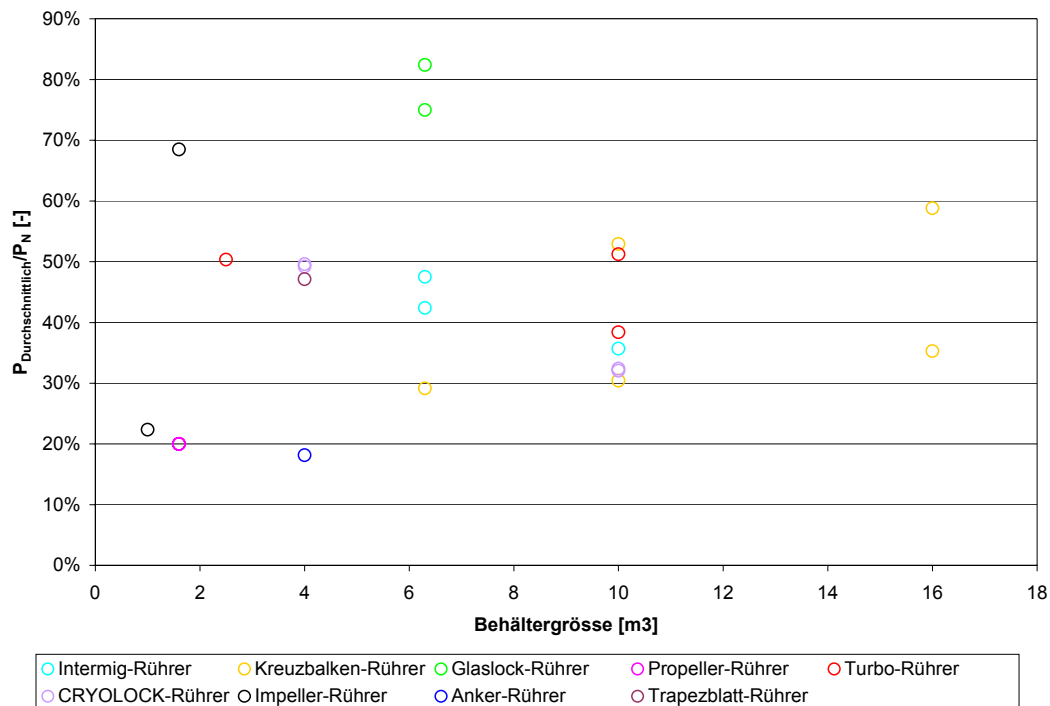
⁸ Erfahrungswerte verschiedener Meister und Betriebsleiter

Die neuerlichen Messungen zeigten, wie in Figur 22 dargestellt, eine relativ kleine Spannungsbreite der effektiven Leistungsaufnahme des Rührwerksmotors. Insbesondere wurde fast keine Abhängigkeit von der Umdrehungsgeschwindigkeit entdeckt⁹. Der kurze Peak zu Beginn einer höheren Umdrehungsgeschwindigkeit ist damit zu erklären, dass die gesamte Reaktionsmasse auf eine höhere Geschwindigkeit gebracht werden muss. Ist diese erreicht, sind ausschliesslich die Verluste auszugleichen, wodurch die Rührerleistung wieder auf den ursprünglichen Wert sinkt. Ein Unterschied zu den Untersuchungen in [20] liegt sicherlich darin, dass in [20] die für eine bestimmte Rühraufgabe tatsächlich benötigten Leistungen untersucht wurden (Hilfe zur Auslegung von Rührwerken), wohingegen in den hier durchgeführten Messungen die Leistungsaufnahme installierter Rührwerksmotoren betrachtet wurde (inklusive Reibungs- und Transmissionsverluste).

Eine Zusammenstellung der Verhältnisse von Nenn- zu Nutzleistung ist in Figur 23 dargestellt. Es zeigt sich, dass, mit wenigen Ausnahmen, die bezogenen Leistungen im Bereich von 30 % bis 50 % der Nennleistung liegen. Klare Abhängigkeiten von Rührwerkstypen lassen sich aus der beschränkten Datenlage nicht ableiten. Dies wird jedoch eventuell im weiteren Fortgang der Arbeit durch zusätzliche Messungen möglich sein (siehe Kapitel 7). Somit sollte sich ein Modell zum Rührwerksverbrauch gemäss Gleichung (10) bilden lassen.

$$EV = K_R * P_N * t \quad (10)$$

Hierbei steht EV für den Elektrizitätsverbrauch in kWh, K_R für eine vom Rührertyp abhängige Konstante, P_N für die Nennleistung des Rührwerksmotors in kW und t für die Rührzeit in h.



Figur 23: Durchschnittliche Leistungsaufnahme vs. Nennleistung für verschiedene Rührertypen

⁹ Bereich der Rührerdrehzahlen von ca. 20 U/min bis mehr als 100 U/min

5.3.5 Dampfstrahlvakuumpumpen

Messungen für Dampfstrahlvakuumpumpen wurden keine durchgeführt. Literaturstudien [22-27] und verschiedene Gespräche mit Experten¹⁰ bestätigten die Annahme, dass der Dampfverbrauch von Dampfstrahlvakuumpumpen nicht von der tatsächlichen Saugleistung, sondern primär von den Apparateparametern (Düsenöffnungen, etc.) abhängt und somit nicht geregelt werden kann. Dadurch ist der Dampfverbrauch durch die Herstellerspezifikationen gegeben und verhält sich in der Zeit gemäss Gleichung (11). Eine kurze Zusammenstellung des Dampfverbrauches einiger handelsüblicher Dampfstrahlvakuumpumpen mit Massensaugstrom von 1 kg/h Luft ist in Tabelle 3 dargestellt.

$$DV = K \cdot t \quad (11)$$

In dieser Gleichung bezeichnet DV den Dampfverbrauch in kg, K ist eine Pumpspezifische Konstante, welche den durchschnittlichen Dampfverbrauch in kg/h beschreibt und t steht für die Zeit in h.

Tabelle 3: Dampf- und Kühlwasserverbrauch versch. vierstufiger Dampfstrahlvakuumpumpen gemäss Produktkatalog von *GEA Jet Pumps*

Nennsaugdruck [mbar abs.]	Triebdampf Überdruck [bar]	Dampfverbrauch [kg/h]	Kühlwasserverbrauch [kg/h]	Sauganschluss [DN] ¹¹
1	3	60	3.5	80
	5	55	3.2	
	8	-	-	
2.5	3	46	2.6	80
	5	42	2.5	
	8	-	-	
5	3	40	2.2	50
	5	36	2.1	
	8	33	2.0	
10	3	35	2.0	50
	5	30	1.8	
	8	29	1.7	
20	3	29	1.7	25
	5	26	1.5	
	8	26	1.5	

Der Wasserverbrauch kann somit wie in Gleichung (12) dargestellt berechnet werden, wobei WV den Wasserverbrauch in kg, K den spezifischen Wasserverbrauch in kg/h und t die Arbeitszeit in h bezeichnet.

$$WV = K \cdot t \quad (12)$$

¹⁰ Insbesondere das Gespräch mit Herrn A. Riatti (Firma GEA-Wiegand) vom 31.07.2002

¹¹ Nennweite des Anschlusses

6 Diskussion

Die Resultate der „bottom-up“ und der „top-down“ Untersuchungen sollen im Folgenden kurz diskutiert und die daraus resultierenden Schlussfolgerungen dargelegt werden

6.1 Gebäudeebene

Die Untersuchungen auf Gebäudeebene („top-down“) zeigten, dass bei Mehrzweck-Mehrprodukte-Batch-Anlagen Vorhersagen über oder Modellierung des Energieverbrauches nicht oder nur sehr beschränkt möglich und mit grossen Unsicherheiten behaftet sind. Die Produkte und Prozesse sind zu unterschiedlich, als dass sich simple und genaue Modelle im Sinne von Gleichung (1) erstellen liessen; der Produktmix ändert zu stark.

Dies steht in klarem Gegensatz zu den Ergebnissen bei Monoanlagen oder bei kaum änderndem Produktmix (Mengenverhältnisse der produzierten Chemikalien bleiben sich etwa gleich). Hier lassen sich Modelle auf Gebäudeebene ableiten, welche jedoch jeweils ausschliesslich für die einzelnen Gebäude und den untersuchten Produktmix Geltung haben und auf dieser Abstraktionsebene kaum generalisiert werden können.

Es zeigte sich zudem, dass der Energieverbrauch der Gebäudeinfrastruktur einen erheblichen Anteil des Gesamtverbrauches ausmacht (ca. 50 % bei der Elektrizität und ca. 10-20 % beim Dampf und der Kühlsole). Somit hängt ein signifikanter Anteil des Energieverbrauches nicht von der produzierten Chemikalienmenge ab. Dies bestätigt die von Industrievertretern bereits vielfach gemachte Aussage, dass es bezgl. Energieverbrauch effizienter ist, einen Produktionsbetrieb 70 % des Jahres mit 100 % laufen zu lassen und den Rest des Jahres abzuschalten, als ihn das ganze Jahr mit 70 % Auslastung zu fahren.

Auch die Analysen mit besserer zeitlicher Auflösung (Tages- oder Stundenbasis) resultierten in keinen besseren Modellen, es musste somit ein anderer Ansatz gewählt werden, welcher im Kapitel 6.2 kurz diskutiert wird.

Für den Heizdampfverbrauch liessen sich auf Gebäudeebene eindeutige Modelle aufbauen. Es zeigte sich, dass der Grundverbrauch von den Infrastrukturanlagen, welche zusätzlich zum Heizsystem am Heizdampf angeschlossen sind abhängt. Der eigentliche Heizdampfverbrauch ist proportional zur Luftumwälzung im Gebäude mal den Heizgradtagen. Dies zeigt, dass die Abstrahlung der einzelnen Apparate keinen signifikanten Einfluss auf den Heizenergiebedarf hat, resp. sich mit der „Kälteabstrahlung“ der zu kühlenden Apparaturen ausgleicht.

6.2 Apparateebene

Auf dieser Ebene wurden verschiedene Modelle für einzelne Einheitsoperationen aufgebaut. Im Speziellen wurden Modelle für den Energieverbrauch von Schaufeltrockner, Wärmekammern, Rührwerke im Allgemeinen und Dampfstrahlvakuumumpen aufgebaut.

Die Modelle für Schaufeltrockner zeigten klar, dass verschiedene Apparaturen des selben Typs sehr unterschiedliche Spezifikationen besitzen können. Somit wurden die Apparatparameter, sowie ausgewählte produktespezifische Daten in die Modelle eingebaut. Dies ermöglicht eine einfache Anpassung der grundlegenden Modelle auf die vorhandenen Produkte und Apparate. Ein Vergleich zwischen berechnetem und gemessenem Dampfverbrauch zeigte eine gute Übereinstimmung.

Für die einfache Einheitsoperation einer Wärmekammer (Aufschmelzen von Festprodukten in Fässern) wurde ein Modell für den Dampfverbrauch aufgebaut. Es zeigte sich, dass diese Apparatur sehr ineffizient arbeitet (schlechter Wärmeübergang Gas-Feststoff, sowie grosses Kammervolumen und –Oberfläche). Es wurde beobachtet, dass nur ein kleiner Teil der bezogenen Dampfenergie tatsächlich an das aufzuschmelzende Produkt übergeben werden kann und der grösste Teil durch Abstrahlung verloren geht. Der absolute Dampfverbrauch dieser Apparatur ist aber im Vergleich zu dem eines Schaufeltrockners erheblich kleiner (Durchschnittlich ca. 9 kg/h Dampf bei der Wärmekammer im Vergleich zu durchschnittlich ca. 63 kg/h Dampf beim Schaufeltrockner), was die prozentual hohen Verluste relativiert.

Die durchgeführten Rührwerkmessungen zeigen eine von der Umdrehungsgeschwindigkeit und der Viskosität, sowie der Dichte der Reaktionsmasse unabhängige Leistungsaufnahme der Rührwerke. Dies dürfte einerseits mit dem Betrieb im turbulenten Strömungsbereich (Ne ist konstant) zusammenhängen. Andererseits wird die hauptsächliche Arbeit beim Anfahren oder bei einer Erhöhung der Umdrehungsgeschwindigkeit benötigt (vgl. Peaks in Figur 22). Ist die Reaktionsmasse einmal in Bewegung müssen ausschliesslich die Reibungsverluste ausgeglichen werden, was zu einem Absinken der benötigten Leistung auf den ursprünglichen Wert führt. Genauere Untersuchungen könnten eine Abhängigkeit des Verhältnisses von Nenn- zu Nutzleistung in Bezug auf den Rührertyp zeigen. Um hierzu verlässliche Angaben zu machen sind noch zu wenige unterschiedliche Rührwerke vermessen worden, was jedoch im weiteren Fortgang der Arbeit noch getan werden soll.

Der Dampfverbrauch der Dampfstrahlvakuumpumpen wurde nicht explizit gemessen. Hierzu wurde eine Literaturstudie durchgeführt, sowie Experten befragt. Dies führte zu der Erkenntnis, dass der Dampfverbrauch nicht von spezifischen Arbeitsbedingungen abhängig ist, sondern sich ausschliesslich durch die Apparatespezifikationen (insbesondere der Düsengrösse) ergibt. Die Angaben zum stündlichen Dampfverbrauch (in der Grössenordnung des stündlichen Verbrauches eines Schaufeltrockners für die Verwendung findenden Grössen) konnten somit vom Hersteller übernommen werden. Es zeigte sich, dass die Dampfstrahlvakuumpumpen signifikante Dampfverbraucher sind und somit äusserst sparsam eingesetzt werden sollten.

7 Ausblick

Wie aus Kapitel 5.3 ersichtlich ist, konnten durch die Analyse einzelner Apparate anpassbare Modelle entwickelt werden, welche nur wenige substanz- und apparate-spezifische Daten benötigen. Um aufgrund dieser einzelnen Modelle und den Angaben aus PP und BVO den Energieverbrauch eines Gebäudes modellieren zu können, müssen weitere Modelle der am häufigsten benutzten Einheitsoperationen aufgebaut werden. Die als nächstes bezüglich ihres Energieverbrauches zu untersuchenden Einheitsoperationen und Apparaturen sind Druckrührnutschentrockner, Vakuumpumpen, Reaktoren (sowohl für Reaktionen, als auch für Kristallisationen) und Batch-Destillationskolonnen. Ein spezielles Augenmerk soll dem Vergleich der Modelle der Druckrührnutschentrockner mit denjenigen der Schaufeltrockner (siehe Kapitel 5.3.2) geschenkt werden. Die Frage, welche Apparaturen effizienter sind wird von speziellem Interesse sein. Zudem wird auch ein spezieller Reaktor mit einem Wärmeträgeröl-Heizsystem (im Unterschied zu den gebräuchlichen Druckwassersystemen) untersucht werden, woraus sich ein weiteres interessantes Einheitsoperationsmodell bilden lassen sollte.

Generelle Untersuchungen zur Effizienz der indirekten Solekühlung im Gebäude 1 werden ebenfalls durchgeführt werden. Hierbei interessiert insbesondere, wie gross die Einsparungen bei einem Wechsel auf direkte Fabriksolenkühlung sein dürften.

Das in den bisherigen Modellen verwendete Grundprinzip soll beibehalten werden. Die Modelle sollen weiterhin einfach auf andere Apparaturen der selben Familie und andere Produkte übertragbar bleiben und den Energieverbrauch einer Einheitsoperation mit für die Produktion genügender Genauigkeit modellieren.

Gleichzeitig sollen weitere Messungen von verschiedenen Rührwerken durchgeführt werden, um ein generelles Modell des Energieverbrauches der Rührwerke (Verhältnis von Nenn- zu Nutzleistung in Abhängigkeit des Rührertyps) entwickeln zu können.

Verschiedene Einheitsoperationen, welche den selben Zweck erfüllen (wie z.B. Druckrührnutschentrockner und Schaufeltrockner oder Dampfstrahlvakuum pumpen und Keramik-Vakuumpumpen) sollen miteinander verglichen werden, um Aussagen über die Effizienz und eventuell über das am besten geeignete Einsatzgebiet machen zu können.

Mit Hilfe dieser einzelnen Modelle soll alsdann der Gesamtenergieverbrauch des Gebäudes 1 für die Energien Dampf, Strom und Sole (unter Berücksichtigung der Angaben in PP und BVO) auf Wochenbasis modelliert werden. Die Übertragbarkeit der Modelle zwischen verschiedenen Produkten sollte dadurch bestätigt oder widerlegt werden können. Zur Verifizierung der Übertragbarkeit auf unterschiedliche Apparaturen sollte der Verbrauch eines anderen Gebäudes analog modelliert werden. Eventuelle Unterschiede zwischen Modell und Realität sind entsprechend zu begründen. Hierbei sollte besonderes Augenmerk auf die Unsicherheitsbetrachtung (z.B. Sensitivitätsanalyse) gelegt werden.

8 Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

8.1 Abkürzungen und Symbole

BVO	Betriebsvorschrift	
C	Konstante	
CM	Chemikalienmenge	[t]
$\cos\varphi$	Wirkungsgrad des Motors	[-]
c_p	Wärmekapazität	[kJ/kg K]
d	Rührerdurchmesser	[m]
DN	Nenndurchmesser	[-]
DV	Dampfverbrauch	[kg]
E	Energieverbrauch	[kWh]
EV	Elektrizitätsverbrauch	[kWh]
HDV	Heizdampfverbrauch	[t]
HGT	Heizgradtage	[°C d]
ΔH_M	Schmelzenthalpie	[kJ/kg]
ΔH_V	Verdampfungsenthalpie	[kJ/kg]
I	Strom	[A]
K	Konstante	
LU	Luftumwälzung	[h ⁻¹]
m	Massendurchfluss	[kg/s]
M	Masse	[kg]
n	Drehzahl	[U/s]
Ne	Newton-Zahl	[-]
P	Leistungsaufnahme	[kW]
PP	Produktionsprotokoll	
R	Rührereintrag	[kJ/h]
ρ	Dichte	[kg/m ³]
SV	Soleverbrauch	[kWh]
t	Zeit	[h]
T	Temperatur	[K]
ΔT	Temperaturunterschied	[K]
U	Spannung	[V]
V	Verlust	
WV	Wasserverbrauch	[kg]

8.2 Indizes

1	Ein
2	Aus
D	Dampf
E	Einheitsoperation
H	Heizsystem
LM	Lösungsmittel
N	Auslegegrösse
P	Produkt
R	Rührwerk
S	Apparatur (Stahl)

9 Literaturverzeichnis

- [1] P. T. Anastas and J. C. Warner, *Green Chemistry: Theory and Practice*. Oxford: Oxford University Press, 1998.
- [2] B. Linnhoff, "Pinch Analysis - a State-of the-Art Overview," *Trans IChemE Part A*, vol. 71, pp. 503-522, 1993.
- [3] I. C. Kemp and E. K. Macdonald, "Application of Pinch Technology to Separation, Reaction and Batch Processes," in *Understanding Process Integration II*, vol. 109, *Symposium Series*, R. Smith, Ed. Rugby, UK: The Institution of Chemical Engineers, 1988, pp. 239 - 259.
- [4] S. Stoltze, J. Mikkelsen, B. Lorentzen, P. M. Petersen, and B. Qvale, "Waste-Heat Recovery in Batch Processes Using Heat Storage," *Journal of Energy Resources Technology; Transactions of the ASME*, vol. 117, pp. 142-149, 1995.
- [5] C. Blickenstorfer, "Analyse des Energieverbrauchs eines Mehrprodukte-Batch-Betriebes," in *Laboratorium für Technische Chemie*. Zurich: ETH, 1999.
- [6] G. Ashton, "Design of Energy Efficient Batch Processes," in *Energy Efficiency in Process Technology*, P. A. Pilavachi, Ed. London: Elsevier Applied Science, 1993, pp. 1050-1062.
- [7] I. C. Kemp and A. W. Deakin, "The Cascade Analysis for Energy and Process Integration of Batch Processes," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 67, pp. 495 - 525, 1989.
- [8] I. C. Kemp and E. K. MacDonald, "Energy and Process Integration in Continuous and Batch Processes," presented at Innovation in Process Energy Utilisation, Bath, 1987.
- [9] J. Corominas, A. Espuña, and L. Puigjaner, "Method to Incorporate Energy Integration Considerations in Multiproduct Batch Processes," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 18, pp. 1043-1055, 1994.
- [10] Anonymus, "Saving Energy in Chemical Batch Processing Plants," *Process Engineering*, vol. 75, pp. s17-s18, 1994.
- [11] P. Krummenacher, "Energetische Integration von Batch-Prozessen," *SI+A*, vol. 38, pp. 757-763, 1997.
- [12] P. Krummenacher and D. Favrat, "Indirect and Mixed Direct-Indirect Heat Integration of Batch Processes Based on Pinch Analysis," *Int. J. Applied Thermodynamics*, vol. 4, pp. 135-143, 2001.
- [13] P. Krummenacher and R. Morand, "Energieoptimierung und Kältekonzept," *SI+A*, vol. 38, pp. 746-749, 1997.
- [14] S. R. Chari, "Take Another Look at Steam Traps," *Chem Eng Prog*, vol. 97, pp. 62-63, 2001.
- [15] R. H. Perry, D. W. Green, and J. O. Maloney, "Perry's Chemical Engineers' Handbook," 7th ed. New York: McGraw-Hill.
- [16] P. W. Atkins, *Physikalische Chemie*. Weinheim: VCH, 1990.
- [17] F. K. Kneubühl, *Repetitorium der Physik*, 5th ed. Stuttgart: B. G. Teubner, 1994.
- [18] P. Grassmann, F. Widmer, and H. Sinn, *Einführung in die thermische Verfahrenstechnik*, 3rd ed. Berlin: Walter de Gruyter, 1998.
- [19] D. R. Lide, "Handbook of Chemistry and Physics," 75th ed. London: CRC Press, 1995.
- [20] A. Mersmann, W.-D. Einenkel, and M. Käppel, "Auslegung und Masstabsvergrößerung von Rührapparaten," *Chem Ing Tech*, vol. 47, pp. 953-964, 1975.
- [21] "Energiebedarfstabellen für die Produktion," Firmenintern.
- [22] "Dampfstrahl-Vakuumpumpen," GEA-Wiegand, Ettlingen, Sales Brochure.

- [23] "Porzellan/Graphit-Dampfstrahl-Vakuumpumpen," GEA-Wiegand, Ettlingen, Sales Brochure.
- [24] "Aus der Theorie der Dampfstrahlpumpen," GEA-Wiegand, Ettlingen, Sales Brochure.
- [25] H. Baier, "Vakuumerzeugung durch Dampfstrahl-Vakuumpumpen," *Vakuum in der Praxis*, pp. 127-135, 1989.
- [26] H. El-Dessouky, H. Ettouney, I. Alatiqi, and G. Al-Nuwaibit, "Evaluation of Steam Jet Ejectors," *Chem. Eng. Process.*, vol. 41, pp. 551-561, 2002.
- [27] F. Hinrichs, "Aufbau, Betriebsverhalten und Regelbarkeit von Dampfstrahl-Vakuumpumpen," *Vakuum in der Praxis*, pp. 102-109, 1991.