

DK 621.317.385:697.34:697.347:725.215

Energie- und Leistungsbedarf eines Kaufhauses

Von R. Kunz und L. Rouvel, Karlsruhe*)

Anhand von Messungen wird für ein Kaufhaus der Energie- und Leistungsbedarf für die Energieträger Strom und Fernwärme analysiert. Dabei gelingt es, die Einflußgrößen auf die Veränderung des Bedarfs sowohl für das Gesamtgebäude wie auch für die wichtigsten Verbraucher quantitativ zu ermitteln. Durch kritische Beurteilung der Ergebnisse lassen sich Möglichkeiten der Energiekostensenkung aufzeigen. Eine Gesamtenergiebilanz verdeutlicht die unterschiedliche Verbrauchsstruktur zwischen der Strom- und Wärme-seite, wobei die Ergebnisse für moderne Großbauten typisch sind.

Für energiewirtschaftliche Überlegungen und Planungsaufgaben bei Großbauten fehlte oft die Kenntnis der zu erwartenden Energiebedarfsstruktur des Objekts. Die nachfolgende Untersuchung in einem Kaufhaus über den Energie- und Leistungsbedarf sowie die ihn beeinflussenden Parameter soll hierzu einen Beitrag liefern. Obwohl die Ergebnisse nicht ohne weiteres verallgemeinert werden können, geben sie doch einen guten Überblick über die wichtigsten energiewirtschaftlichen Problemstellungen bei solchen Gebäuden.

Überblick über das Untersuchungsobjekt

Zur Untersuchung der Struktur des Energie- und Leistungsbedarfs wurde ein Kaufhaus ausgewählt, das mit seinen technischen Einrichtungen dem heute üblichen Stand entspricht. Hierzu zählen vor allem eine gute Beleuchtung im Gebäude von etwa 600 lx und eine Klimaanlage. Die Verkaufsfläche beträgt rd. 20 000 m², die auf sechs Stockwerke verteilt sind. Im siebten Stockwerk sind mit Ausnahme eines Cafés nur Betriebsräume und Büros untergebracht. Die mittlere Etagenhöhe beträgt 4 m, das Erdgeschoß hat eine Höhe von 4,80 m. Der Personalbestand schwankt je nach Jahreszeit zwischen 800 und 1 200 Personen. Die Anzahl der Kunden, die sich gleichzeitig im Gebäude befinden, kann normalerweise zu etwa 1 000 bis 2 000 Personen angenommen werden.

*) Dipl.-Ing. Reinhard Kunz und Dipl.-Ing. Lothar Rouvel, waren z. Z. der Durchführung dieser Untersuchung Mitarbeiter der Forschungsstelle für Energiewirtschaft in Karlsruhe.

Elektrische Anlagen

Das Kaufhaus wird über eine 20 kV-Einspeisung mit elektrischer Energie versorgt. Die Umspannung auf 220/380 V erfolgt über fünf Transformatoren (2 × 1 000 kVA und 3 × 630 kVA). Die bestellte elektrische Leistung beträgt 2 400 kVA. Für die Notstromversorgung sind zwei Diesellaggrégate mit je 245 kW/265 kVA vorhanden. Über Akkumulatoren kann darüber hinaus noch das Notlicht mit 34,5 kW bedient werden. Die wichtigsten elektrischen Verbraucher sind die Beleuchtungsanlagen mit einer Nennleistung von rd. 1 100 kW, die vollelektrischen Küchen für die Imbißstube, das Restaurant, das Café und die Kantine mit 670 kW, die Ventilatoren für die Klimaanlage, die Luftvorhänge an den Portalen und die Kühltürme mit rd. 650 kW sowie die beiden Kältemaschinen mit zusammen 935 kW.

Wärmetechnische Anlagen

Die Wärmeversorgung des Gebäudes erfolgt über Fernwärme mit einer Anschlußleistung von 6 Gcal/h. Hiervon werden die Klimaanlage, die Heizkörper in den Büro- und Lagerräumen sowie die Warmwassererzeuger versorgt. Ein Dampfkessel von 0,63 Gcal/h zur Verbrennung der Papierabfälle ist der Fernwärmeeinspeisung parallel geschaltet. Das Warmwasser für die Spülmaschinen in den Küchen wird elektrisch nachgeheizt.

Die Klimaanlage, der größte Wärmeverbraucher, arbeitet mit reiner Frischluft. Die Abluft wird nur aus bestimmten Räumen, wie z. B. den Küchen zur Verhinderung von Geruchsbelästigung, abgesaugt, der Hauptanteil verläßt

ungesteuert durch die Eingangstore und die Fenster-schlitze das Gebäude.

Aufteilung des elektrischen Energiebedarfs

Der elektrische Energiebedarf läßt sich aufteilen in zwei Hauptgruppen, nämlich den Grundbedarf, der sich über das gesamte Jahr kaum ändert, sowie den Bedarf der Kältemaschinen. In Bild 1 ist aus einer Meßreihe von fünf Wochen die mittlere Tagesbelastungskurve ohne die Kältemaschinen dargestellt. Außerdem sind noch die wichtigsten meßtechnisch erfaßbaren Verbraucher mit

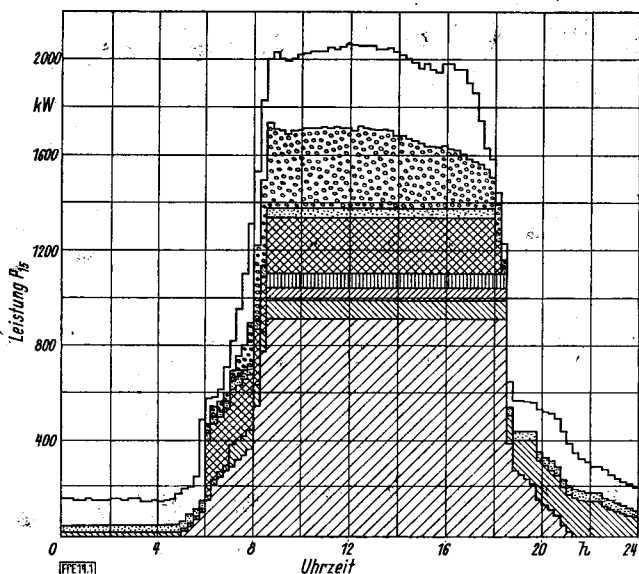


Bild 1. Aufteilung der mittleren Tagesbelastungskurve auf die einzelnen Verbrauchergruppen ohne Kältemaschinen.

- Innenbeleuchtung
- ▨ Schaufensterbeleuchtung
- ▩ Zu- und Ablüfter
- ▧ Lüfter an den Portalen
- ▦ Rolltreppen
- ▤ Kühltruhen in Lebensmittelabteilung
- ▣ Wärme der Küchen
- ▢ Sonstiges

ingezeichnet. Es ist ersichtlich, daß der Leistungsbedarf während der Geschäftszeit zwischen 8⁰⁰ und 18⁰⁰ Uhr kaum Veränderungen aufweist. Die einzige Verbrauchergruppe, die eine merkliche Leistungsänderung aufweist und somit auch den Verlauf der Gesamtbelastung prägt, sind die Küchen.

Der konstante Belastungsverlauf über den Tag wird auch durch die sehr kleine Streubandbreite der über fünf Wochen gemittelten Werte (± 40 kW in der Zeit von 8⁰⁰ bis 18⁰⁰ Uhr und ± 30 kW zwischen 20⁰⁰ und 6⁰⁰ Uhr) gekennzeichnet. In den Zwischenzeiten (6⁰⁰ bis 8⁰⁰ und 18⁰⁰ bis 20⁰⁰ Uhr) ist die Streuung natürlich wesentlich größer, verursacht durch Verschiebungen des Ein- und Ausschaltzeitpunkts der einzelnen Verbrauchergruppen.

Tafel 1. Mittlerer täglicher Stromverbrauch ohne Kältemaschinen.

	kWh/d	%
Innenbeleuchtung	10 220	40,6
Schaufensterbeleuchtung	1 720	6,8
Zu- und Ablüfter	2 870	11,4
Lüfter für die Luftvorhänge	640	2,6
Rolltreppen	500	2,0
Autoaufzüge	200	0,8
Kühltruhen in der Lebensmittelabteilung	910	3,6
Küchen	3 070	12,2
Sonstiges	5 020	20,0
Gesamt	25 150	100,0

Eine Aufteilung des mittleren täglichen Stromverbrauchs zeigt **Tafel 1**. Auch hier sind die Kältemaschinen für die Klimaanlage nicht berücksichtigt.

Beleuchtung

Die Gesamtleistung der Innenbeleuchtung beträgt rd. 910 kW, die über das ganze Jahr während der Geschäftszeit eingeschaltet sind. Davon sind rd. 75 kW Effektbeleuchtung, die sich von Zeit zu Zeit ändert. Rechnerisch ergeben sich aus der installierten Leistung mittlere Beleuchtungsstärken von 600 bis 750 lx Gebrauchswert.

Schaufenster- und Reklamebeleuchtung haben am Tag einen Leistungsbedarf von 76 kW und in den Abendstunden von 166 kW. Nach 23⁰⁰ Uhr wird die Schaufensterbeleuchtung stufenweise zurückgeschaltet.

Küchen

Die elektrische Energie für die Küchen wird hauptsächlich zum Zubereiten der Speisen und zum Nacherwärmen des Warmwassers für die Geschirrspülmaschinen von 45 °C auf 60 bis 70 °C benötigt. Der mittlere Leistungsgang über den Tag ist in **Bild 2** dargestellt. Die Leistungsspitze am Morgen zwischen 8⁰⁰ und 9⁰⁰ Uhr wird durch das Anheizen der Herde und Bratpfannen verursacht. Bis etwa 13³⁰ Uhr bleibt der Leistungsbedarf ziemlich konstant und sinkt danach ab.

Die mittlere Kurve entspricht einem Tagesverbrauch von rd. 3 000 kWh. Die Anzahl der Essen beträgt etwa 3 500 je Tag.

Als Vergleich ist zusätzlich der Leistungsbedarf am ersten Tag im Sommerschlußverkauf mit in **Bild 2** eingezeichnet. Er ist während des gesamten Tages höher als der Mittelwert. Der Tagesverbrauch liegt bei 3 600 kWh bei 5 800 zubereiteten Essen. Wie noch gezeigt wird, ist die geringe Zuwachsrate beim Stromverbrauch durch einen hohen Grundbedarf bedingt.

Klimaanlage

Die Lüftung ist normalerweise in der Zeit zwischen 6⁰⁰ und 18³⁰ Uhr eingeschaltet. Im Hochsommer läuft sie teilweise auch nachts durch. Obwohl die Lüftermotore durch Polumschaltung in vier Stufen betrieben werden können, sind sie die meiste Zeit auf Stufe 4 geschaltet.

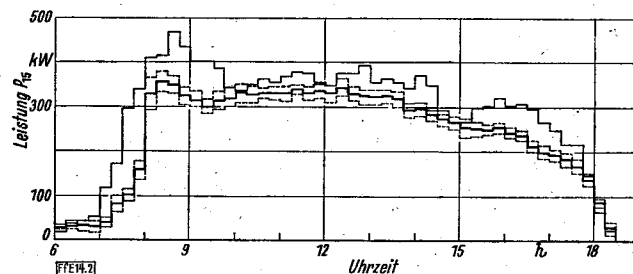


Bild 2. Mittlerer elektrischer Leistungsgang der Küchen.

- erster Tag im Sommerschlußverkauf
- - - Mittelwert aus 13 normalen Tagen
- Erwartungsbereich des Mittelwerts

Eine Anpassung der Frischluftmenge an die Personenbelegung und damit an die Wärmeentwicklung im Gebäude wird also nicht vorgenommen. Da eine entsprechende Steuerung oder Regelung äußerst schwierig ist und kaum befriedigende Ergebnisse bringen kann, erscheint die Möglichkeit der Drehzahlverstellung der Ventilatoren überflüssig, zumal die Luftmenge zusätzlich noch über motorgesteuerte Jalousien in den Klimakammern verändert werden kann.

Die gemessene Leistungsaufnahme der Zu- und Ablüfter liegt bei 230 kW. Hinzu kommen noch rd. 64 kW für die Lüfter der Luftvorhänge in den Portalen, die zwischen 8³⁰ und 18³⁰ Uhr betrieben werden. Die gesamte installierte Leistung beträgt dagegen 555 kW.

Der Energiebedarf für die Kältemaschinen und die Kühltürme ist stark abhängig von der Temperatur und der Feuchtigkeit der Außenluft. Er schwankt zwischen 2 000 und 10 000 kWh je Tag, das sind 8 bis 40% des täglichen Grundbedarfs. Die Leistungsaufnahme liegt zwischen 200 und 600 kW. Daraus wird ersichtlich, daß der Gesamtbedarf hauptsächlich durch die Klimaanlage verändert wird, und somit das Außenklima die Haupteinflußgröße für den elektrischen Leistungsbedarf ist.

Der elektrische Energiebedarf und seine Einflußgrößen

Gesamtbedarf

Da eine Veränderung des Energie- und Leistungsbedarfs mit Ausnahme des geringfügig variierenden Verbrauchs der Küchen hauptsächlich durch die Kältemaschinen verursacht wird, ist ein straffer Zusammenhang mit der Außenenthalpie zu erwarten. Dies wird auch durch Bild 3 bestätigt, in dem der tägliche Stromverbrauch

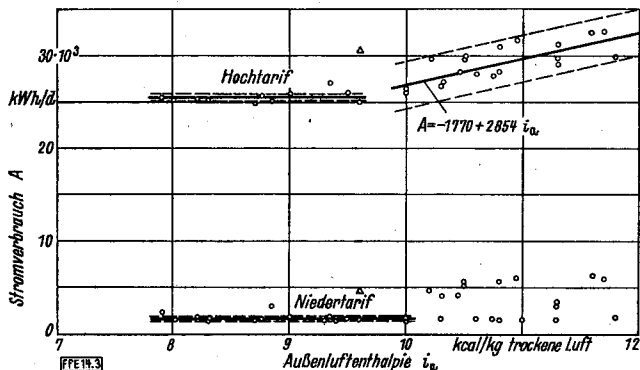


Bild 3. Täglicher Stromverbrauch in Abhängigkeit vom Tagesmittel der Außenluftenthalpie.

— Regressionsgerade
 - - - Streubandbreite
 Δ erster Tag im Sommerschlußverkauf

getrennt nach Hochtarifzeit und Niedertarifzeit in Abhängigkeit vom Tagesmittel der Außenluftenthalpie aufgetragen ist. An allen eingezeichneten Tagen war die Kältemaschine eingeschaltet.

Trotzdem ist der Verbrauch unterhalb einer Enthalpie von 10 kcal/kg trockene Luft konstant. Erst oberhalb 10 kcal/kg trockene Luft ist für die Hochtarifzeit eine Abhängigkeit des Verbrauchs von der Außenluftenthalpie zu erkennen.

Wie noch gezeigt wird, ist dies auch die Grenze für den Übergang des Betriebs von einer auf zwei Kältemaschinen. Dies läßt sich nur aus dem Umstand erklären, daß die Klimaanlage mit Handsteuerung arbeitet und nicht automatisch geregelt wird.

Der etwas höhere Verbrauch in der Niedertarifzeit oberhalb einer Außenluftenthalpie von 10 kcal/kg trockene Luft wird hervorgerufen durch den Betrieb der Lüftungsanlagen und der Kältemaschinen, die teilweise auch nachts eingeschaltet werden. Eine Gesetzmäßigkeit kann jedoch nicht ermittelt werden.

Eine deutliche Abweichung von den gefundenen Zusammenhängen ist am ersten Tag im Sommerschlußverkauf zu erkennen. Dies kommt hauptsächlich durch die sehr starke Erhöhung der Kundenanzahl an diesem Tag und durch die damit erhöhte Wärmeentwicklung im Gebäude. Außerdem hat sich auch der Strombedarf der Küche erhöht.

Ein ähnlicher Zusammenhang wie für den täglichen Stromverbrauch ergibt sich auch für die tägliche Leistungsspitze, Bild 4. Eine Ausnahme bilden hierbei der erste Tag und der lange Verkaufsmorgen im Sommerschlußverkauf. Die Ursachen dürften in beiden Fällen die erhöhte Zahl der Kunden sein. Quantitative Aussagen lassen sich hierfür

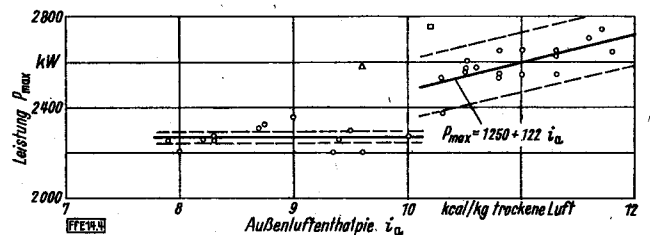


Bild 4. Tägliche Leistungsspitze in Abhängigkeit vom Tagesmittel der Außenluftenthalpie.

— Regressionsgerade
 - - - Streubandbreite
 Δ erster Tag im Sommerschlußverkauf
 □ langer Verkaufsmorgen im Sommerschlußverkauf

jedoch nicht machen, da eine meßtechnische Erfassung mit vertretbarem Aufwand nicht möglich ist.

Küchenbedarf

Für die zweite Verbrauchergruppe, die Küchen, die eine Veränderung der Tagesbelastungskurve hervorruft, läßt sich dagegen ein Zusammenhang mit der Kundenzahl ermitteln.

Hierbei ist die Haupteinflußgröße die Anzahl der täglichen Essen. Da keine Statistik über die Essenzahl vorliegt, wurde sie aus dem jeweiligen Tagesumsatz und dem durchschnittlichen Essenspreis errechnet. Für den täglichen Stromverbrauch A der Küchen ergibt sich in Abhängigkeit von der Anzahl der Essen Z_E folgende Regressionsgleichung:

$$A = 2125 + 0,254 Z_E \text{ in kWh/d} \dots \dots \dots (1)$$

Das Bestimmtheitsmaß mit 82,1% und der Vertrauensbereich mit nur ± 6,3% des Mittelwertes kann als äußerst gut bezeichnet werden. Der Erfahrungsbereich für die Anzahl der Essen beträgt $3055 \leq Z_E \leq 5480$. Für den maximalen Leistungsbedarf P_max ergibt sich dagegen eine wesentlich schlechtere Korrelation:

$$P_{max} = 314 + 0,0195 Z_E \text{ in kW} \dots \dots \dots (2)$$

Das Bestimmtheitsmaß beträgt nur 29,3% und die Streuung ± 16% des Mittelwertes.

Dies erklärt sich einmal aus dem recht hohen Konstantanteil, zum anderen wird die Maximalleistung auch stark durch den zufälligen Einschaltzeitpunkt der Einzelgeräte beeinflusst.

Klimaanlage

Da die Veränderung des elektrischen Energiebedarfs des gesamten Gebäudes fast ausschließlich von der Klimaanlage und somit vom Außenklima bestimmt wird, erscheint eine nähere Untersuchung dieser Anlage erforderlich.

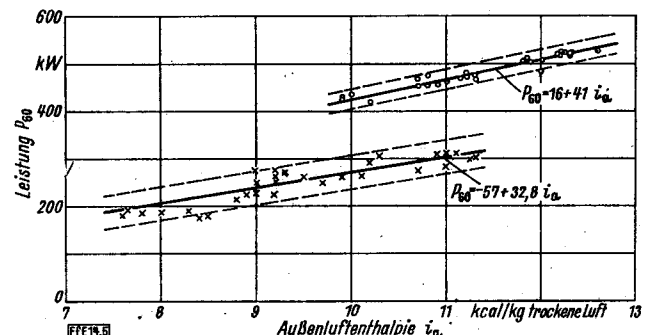


Bild 5. Mittlere stündliche Leistungsaufnahme P_60 der Kältemaschine in Abhängigkeit vom Stundenmittel der Außenluftenthalpie.

— Regressionsgerade
 - - - Streubandbreite
 ○ zwei Kältemaschinen in Betrieb
 x eine Kältemaschine in Betrieb

In Bild 5 ist hierzu die mittlere stündliche Leistungsaufnahme P_{60} der Kältemaschinen über dem Stundenmittel der Außenenthalpie aufgetragen. Dabei wird noch getrennt zwischen einer und zwei Maschinen. Obwohl die Klimaanlage von Hand nach der Raumtemperatur gesteuert wird, wobei die Kälteleistung durch Verstellen der Verdichterschaulen, die Zuluftmenge durch die polumschaltbaren Lüftermotoren und das Verstellen der Jalousien in den Klimakammern variiert werden kann, ergibt sich ein recht straffer Zusammenhang. Das Bestimmtheitsmaß liegt bei 81,3 bzw. 93,9%. Der Übergang von einer auf zwei Maschinen erfolgt im Bereich zwischen 9,9 und 11,3 kcal/kg trockene Luft. Der Leistungssprung wird durch den Konstantanteil der zweiten Maschine bewirkt, die größere Steigung der Geraden für zwei Maschinen durch die Förderung einer größeren Luftmenge, da bei Betrieb von zwei Kältemaschinen immer die maximale Luftmenge durchgesetzt wird.

Aus den beiden Gleichungen zur Ermittlung des Leistungsbedarfs für eine und zwei Maschinen, Bild 5, läßt sich der Grundbedarf je Maschine zu 114 kW errechnen. Das bedeutet, daß etwa 50% des mittleren Stromverbrauchs der Kältemaschinen unabhängig vom Kältebedarf sind, und sich somit die Leistungsziffer stark mit der Auslastung ändert. Als Ursache hierfür kommt hauptsächlich die zu große Auslegung der Maschinen in Frage. So wurden bei der höchsten während des Untersuchungszeitraums aufgetretenen Außenenthalpie von 13 kcal/kg trockene Luft nur rd. 550 kW von den installierten 935 kW in Anspruch genommen. Entsprechend niedrig liegt auch die Leistungsziffer. Sie wurde über eine Wärmebilanz aus Messungen der Frischluftmenge, der Zustandsgrößen der Außenluft und der Einblasluft sowie der elektrischen Leistungsaufnahme an zwei verschiedenen Tagen ermittelt. Die Leistungsziffer beträgt danach 3,5 für den maximalen Wert der Außenluftenthalpie von 13 kcal/kg trockene Luft im Meßzeitraum, im Mittel ist sie jedoch wesentlich schlechter. Die Frischluftwechselrate wurde hierbei zu rd. 4 gemessen, was je nach Kundenzahl einer Frischluftmenge von 100 bis 200 m³ je Person und Stunde entspricht.

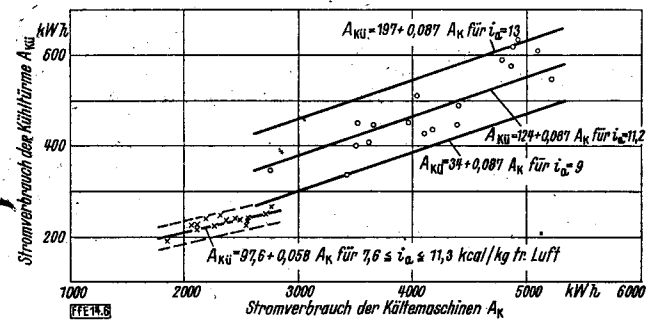


Bild 6. Strombedarf der Kühltürme in Abhängigkeit vom Strombedarf der Kältemaschinen und der mittleren Außenenthalpie während der Geschäftszeit.

— Regressionsgerade
 — Streubandbreite
 ○ zwei Kältemaschinen in Betrieb
 × eine Kältemaschine in Betrieb

Gleichzeitig mit der Veränderung des Energieverbrauchs der Kältemaschinen ändert sich auch der Stromverbrauch der Kühltürme, deren Ventilatoren unmittelbar von der Kältemaschine geregelt werden. Da dies jedoch nur stufenweise erfolgt, muß der Bilanzierungszeitraum von 1 h auf einen größeren Zeitraum ausgedehnt werden, da sonst die zufallsbedingten Streuungen zu sehr stören. Als Meßzeitraum wurde deshalb die Geschäftszeit (8³⁰ bis 18³⁰ Uhr) gewählt, um den Einfluß der unterschiedlichen Ein- und Abschaltzeitpunkte für die Klimaanlage zu eliminieren. Die Ergebnisse zeigt Bild 6. Während beim Betrieb nur einer Kältemaschine eine Abhängigkeit von der Außenluftenthalpie nicht festzustellen ist, steigt der Strombedarf der Kühltürme beim Betrieb von zwei Kältemaschi-

nen mit zunehmender Enthalpie stark an. Dies wird hervorgerufen durch die geringere Wärmeaufnahmefähigkeit der Außenluft mit steigender Enthalpie, wodurch der Luftdurchsatz durch die Kühltürme vergrößert werden muß.

Der Stromverbrauch der Kühltürme A_{Ku} während der Geschäftszeit läßt sich auch direkt als Funktion der Außen-

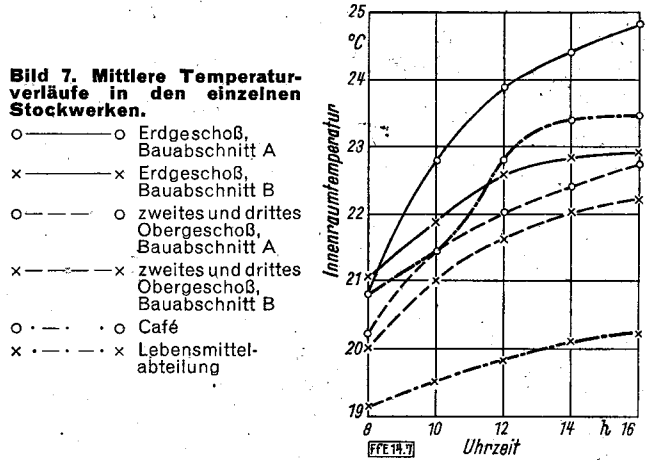


Bild 7. Mittlere Temperaturverläufe in den einzelnen Stockwerken.

○ Erdgeschoß, Bauabschnitt A
 × Erdgeschoß, Bauabschnitt B
 ○ — — — — — zweites und drittes Obergeschoß, Bauabschnitt A
 × — — — — — zweites und drittes Obergeschoß, Bauabschnitt B
 ○ — · — · Café
 × — · — · Lebensmittelabteilung

luftenthalpie schreiben, da der Stromverbrauch der Kältemaschinen A_K selbst eine Funktion der Außenenthalpie ist, Bild 5. Es ergibt sich hierfür:

$$A_{Ku} = 1520 + 9,1 i_a \text{ in kWh} \dots \dots \dots (3)$$

und

$$A_{Ku} = -477 + 86,6 i_a \text{ in kWh} \dots \dots \dots (4)$$

Dabei gilt Gl. (3) bei Betrieb nur einer Kältemaschine, Gl. (4) für beide Kältemaschinen.

Da der elektrische Energiebedarf der Klimaanlage in erheblichem Umfang von der Betriebsweise abhängt, wurden während eines Zeitraums von vier Wochen die Lufttemperaturen im Gebäude an mehreren Stellen gemessen. Stichprobenweise wurde auch die Luftfeuchte bestimmt. Dabei stellte sich heraus, daß der Wassergehalt über den Tag fast konstant war, jedoch von Tag zu Tag stark schwankte. Als Extremwerte wurden 7,4 und 10,7 g H₂O/kg trockene Luft ermittelt. Die Innenlufttemperaturen verändern sich über den Tag hinweg jedoch erheblich. Die mittleren Temperaturverläufe in der Zeit von 8⁰⁰ bis 18⁰⁰ Uhr sind in Bild 7 dargestellt. Am Morgen ist es verhältnismäßig kühl. Bis um 16⁰⁰ Uhr steigt die Temperatur teilweise bis auf 25 °C an. Eine Ausnahme bildet die Lebensmittelabteilung, in der die Raumtemperatur aus verkaufpsychologischen Gründen niedrig gehalten wird.

Das starke Ansteigen der Temperaturen am Morgen wird durch die Betriebsweise der Klimaanlage hervorgerufen. So werden die Zuluftzustände während der gesamten Betriebszeit am Tag etwa konstant gehalten. Hierdurch wird das Gebäude am Morgen vor Geschäftsbeginn unterkühlt. Nach Einschalten der Beleuchtung und verschiedener Geräte im Verkaufsraum sowie mit wachsender Personenzahl steigt die Raumtemperatur rasch an. Das bedeutet, daß die mit der Zuluft zugeführte Kühlleistung kleiner ist als die innere Wärmeentwicklung von rd. 1,2 Gcal/h in den klimatisierten Räumen. Die Sonneneinstrahlung hat hier aufgrund der baulichen Ausstattung keinen Einfluß. Obwohl diese Betriebsweise im Hinblick auf die Raumkonditionierung keinesfalls günstig ist, wird hierdurch der elektrische Leistungsbedarf für die Klimaanlage verringert.

Wesentlich stärker vermindert sich jedoch der Heizleistungsbedarf, da die Anfahrtspitze am Morgen nicht auftritt. Das Gebäude wird demnach während des Tages durch die inneren Wärmequellen (Beleuchtung usw.) hochgeheizt. Daß eine solche Fahrweise jedoch nur dann sinn-

voll ist, wenn die sich daraus ergebenden Vorteile ausgenutzt werden, wird noch näher behandelt.

Der Wärmebedarf und seine Einflußgrößen

Ebenso wie der elektrische Energieverbrauch teilt sich auch der Wärmebedarf des Kaufhauses in einen konstanten und in einen variablen Anteil auf. Während jedoch bei der elektrischen Energie der Grundbedarf den Hauptanteil am Gesamtverbrauch darstellt, ist es bei der Wärmeenergie gerade umgekehrt. Die Haupteinflußgröße auf den Wärmebedarf ist die Außentemperatur. Da der Hauptwärmeverbraucher die Klimaanlage ist, müßte auch die Luftfeuchtigkeit berücksichtigt werden. Es lagen jedoch für den vorliegenden Fall keine Meßwerte vor.

In Bild 8 ist deshalb der monatliche Wärmebezug über der Monatsmitteltemperatur aufgetragen. Daraus ist ersichtlich, daß über 16 °C der Verbrauch mit im Mittel

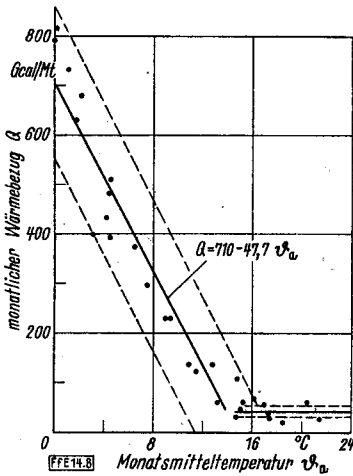


Bild 8. Monatlicher Wärmebezug in Abhängigkeit von der Monatsmitteltemperatur.
 — Regressionsgerade
 - - - Streubandbreite

42,6 Gcal/Mt konstant ist. Die Regressionsanalyse für den Temperaturbereich zwischen 0 °C und 16 °C ergab ein Bestimmtheitsmaß von 91,2%.

Unter Berücksichtigung der Einschaltdauer der Klimaanlage und des Transmissionswärmebedarfs in der Nacht errechnet sich aus der Regressionsgleichung, Bild 8, für die Auslegungstemperatur von -12 °C ein mittlerer stündlicher Wärmebedarf während der Geschäftszeit von 3,5 Gcal/h. Dieser Wert wird auch nicht erhöht, wenn man die Wärmeerzeugung des Dampfkessels (Papierverbrennungsöfen) hinzurechnet, da dessen mittlere Wärmeabgabe weniger als 10% seiner Nennleistung von 0,63 Gcal/h beträgt.

Aus der Messung der maximalen Wärmeleistung für die Warmwasserbereitung und aufgrund der Fahrweise der Klimaanlage kann geschlossen werden, daß bei einer errechneten mittleren Leistung von 3,5 Gcal/h bei -12 °C eine Leistungsspitze von maximal 3,8 Gcal/h zu erwarten ist.

Dieser Wert liegt jedoch wesentlich unter der bestellten Leistung von 6 Gcal/h. Bei einer überschläglichen Nachrechnung des Anschlußwertes hat sich der Wert von 6 Gcal/h bestätigt. Selbst der um die Anheizspitze reduzierte Wert von 5,4 Gcal/h übersteigt den maximalen Leistungsbedarf von 3,8 Gcal/h, der aus den Meßwerten ermittelt ist, um 42%.

Als Ursache für diese „Überdimensionierung“ stellte sich heraus, daß die Klimaanlage während der Heizperiode als reine Lüftungsanlage betrieben wird, d. h. eine Befeuchtung der Zuluft wird nicht vorgenommen. Diese Fahrweise, die bei der Planung der Anlage nicht vorgesehen war, wird folgendermaßen begründet:

Erstens ergeben sich durch die Handsteuerung der Klimaanlage bei Luftbefeuchtung keine befriedigenden Ergebnisse für das Raumklima, da die Raumtemperatur

nur durch laufende Nachregelung auf dem gewünschten Wert gehalten werden könnte.

Zum zweiten sollten die Energiekosten niedrig gehalten werden. Da bei elektrischer Energie keine Einsparungen zu erreichen sind, sollte mit der gewählten Maßnahme der Wärmeverbrauch eingeschränkt werden. Der gewünschte Erfolg stellte sich jedoch nicht ein, da der Grundpreis, d. h. die bestellte Leistung den größten Anteil an den Fernwärmekosten ausmacht. So werden durch die Verringerung des Wärmeverbrauchs die Fernwärmekosten nur um etwa 10 bis 15% gesenkt, während eine Verkleinerung der bestellten Leistung von 6 Gcal/h auf den erforderlichen Wert von 3,5 bis 4 Gcal/h eine Verringerung der Kosten um mehr als 30% bewirken würde.

Der Wärmebedarf für die Warmwasserbereitung ist von der Außentemperatur unabhängig und erscheint deshalb in Bild 8 als Grundbedarf. Dagegen ergibt eine Regressionsanalyse für den täglichen Wärmeverbrauch für Warmwasserbereitung in Abhängigkeit von der Warmwassermenge V_w in m^3/d einen sehr straffen Zusammenhang

$$Q = 0,193 + 0,033 V_w \text{ in Gcal/d} \dots \dots \dots (5)$$

mit einem Bestimmtheitsmaß von 95,8%. Die Warmwassermenge schwankt dabei zwischen 40 und 77,5 m^3 je Tag. Aus Gl. (5) errechnet sich eine Warmwassertemperatur von im Mittel 45 °C, wenn man von einer Kaltwassertemperatur von 12 °C ausgeht.

Es konnte außerdem noch ein Zusammenhang zwischen Kaltwasserverbrauch V_k und Warmwasserverbrauch ermittelt werden:

$$V_k = 193 + 2,14 V_w \text{ in } m^3/d \dots \dots \dots (6)$$

Der Leistungsgang des Wärmeverbrauchs für Warmwasser über den Tag zeigt Bild 9. Hieraus ist ersichtlich, daß das Maximum zwischen 12⁰⁰ und 18⁰⁰ Uhr liegt. Eine Überlagerung der Maximalwerte für die Klimaanlage und für die Warmwasserbereitung tritt daher nicht auf.

Eine deutliche Erhöhung des Verbrauchs für die Warmwasserbereitung wurde während des Winterschlußverkaufs festgestellt. Dies dürfte vor allem von der größeren Essenzahl während dieser Zeit und somit von dem höheren Wasserverbrauch der Geschirrspülmaschinen herrühren.

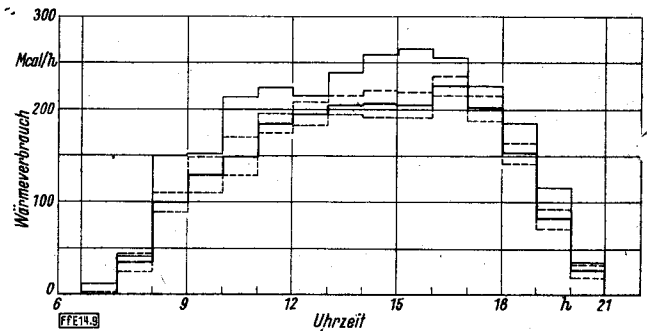


Bild 9. Mittlerer Wärmeleistungsgang für Warmwasserbereitung
 — mittlerer Bedarf von drei Tagen im Winterschlußverkauf
 - - - Mittelwert aus 20 normalen Tagen
 ····· Erwartungsbereich des Mittelwerts

Gesamtenergiebilanz

Bei der Analyse der Verbrauchsstruktur für die Energieträger Strom und Fernwärme konnte gezeigt werden, daß völlig unterschiedliche Energiebezugsbedingungen vorliegen. Während bei der elektrischen Energie ein sehr hoher Grundbedarf vorhanden ist und der veränderliche Anteil nur einen geringen Einfluß auf den Gesamtbedarf hat, sind die Verhältnisse auf der Wärmeseite gerade umgekehrt.

Gut verdeutlicht wird dies durch die in Bild 10 dargestellte Gesamtenergiebilanz. Hierbei wird unterschieden zwischen der Aufteilung des jährlichen Energieverbrauchs und der

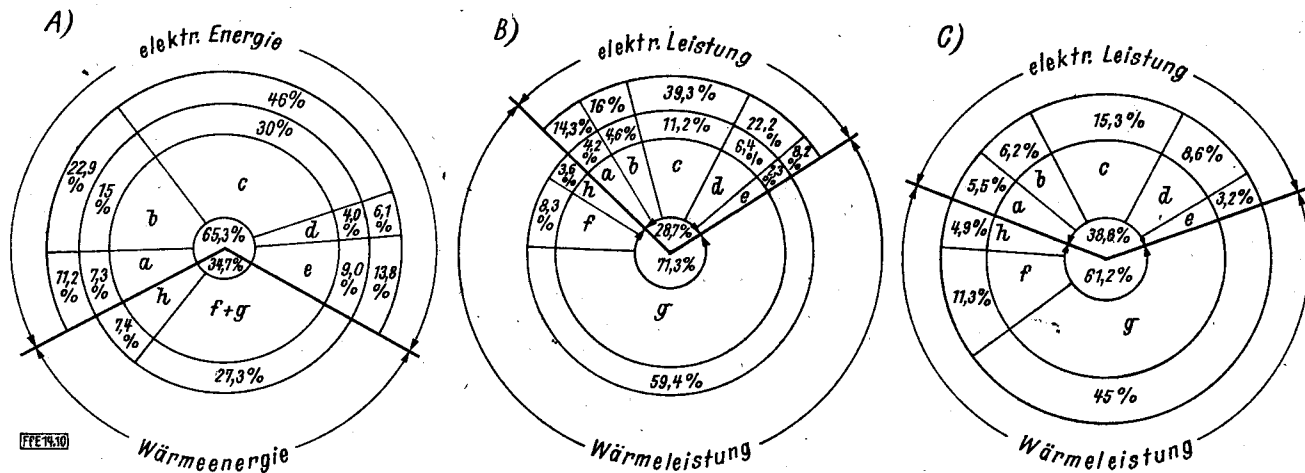


Bild 10. Prozentuale Aufteilung des Jahresenergieverbrauchs und des Leistungsbedarfs.

- A Jahresenergieverbrauch
- B Leistungsbedarf mit Luftbefeuchtung
- C Leistungsbedarf ohne Luftbefeuchtung
- a Küchen
- b Sonstiges
- c Beleuchtung
- d Kältemaschine
- e Zu- und Ablüfter
- f Heizung
- g Lüftung
- h Warmwasserbereitung

Aufteilung des maximalen Leistungsbedarfs. Die Leistungsanzahl ist zweimal vorgenommen, nämlich einmal für den derzeitigen Stand der Fernwärmeanschlußleistung (mit Luftbefeuchtung) und zum anderen für die erforderliche Fernwärmeanschlußleistung entsprechend der Betriebsweise der Klimaanlage (ohne Luftbefeuchtung). Die Umrechnung auf ein gemeinsames Maßsystem erfolgte mit dem Wert von 860 kcal/kWh.

Rund zwei Drittel des Gesamtenergieverbrauchs, dagegen nur etwa ein Drittel des Gesamtleistungsbedarfs entfallen auf die elektrische Energie. Die Benutzungsdauer der installierten bzw. maximalen Leistung ist daher bei der Stromversorgung mit rd. 2 700 h/a wesentlich besser als bei der Wärmeversorgung mit etwa 900 h/a. Ähnliche Verhältnisse liegen auch bei modernen Bürogebäuden mit hoher Beleuchtungsstärke vor, für die deshalb auch eine Klimatisierung notwendig ist.

In Bild 10 ist zur besseren Übersicht die prozentuale Aufteilung nicht nur auf den Gesamtbedarf, sondern auch im äußeren Ring der Kreisdiagramme auf den elektrischen

Bedarf bezogen. Daraus ist ersichtlich, daß bei den Stromverbraachern die Ventilatoren die beste Benutzungsdauer haben, gefolgt von der Beleuchtung einschließlich der in der Spalte „Sonstiges“ zusammengefaßten Verbraucher. Für die Küchen ergeben sich wesentlich schlechtere Werte und am ungünstigsten liegen die Kältemaschinen. In der gleichen Größenordnung wie für die Kältemaschinen liegt auch die Benutzungsdauer der Wärmeleistung für die Klimaanlage.

Zusammenfassung

Bei der Untersuchung der Energiebedarfsstruktur eines Kaufhauses hat sich gezeigt, daß einem hohen Stromverbrauch ein relativ geringer Wärmeverbrauch gegenübersteht. Während der Strombedarf einen hohen Grundbedarf aufweist und nur ein kleiner Anteil sich mit dem Außenklima und der Kundenzahl ändert, enthält der Wärmebedarf nur einen sehr geringen Konstantanteil. Hieraus resultiert eine recht hohe Jahresbenutzungsdauer für den Strom von etwa 2 700 h/a gegenüber nur rd. 900 h/a für die Wärme. Die Ergebnisse lassen sich weitgehend auf ähnliche Großbauten übertragen. Aus der Analyse ist auch ersichtlich, daß für die Planung der Anlagen die Betriebsweise genau durchdacht und sinnvoll festgelegt werden sollte, um unnötige Kosten für Investitionen und Energie zu vermeiden.

FFE 14

veröffentlicht in der BWK:

Kunz R., Energie- und Leistungsbedarf eines Kaufhauses.
L. Rouvel FfE-Berichte Nr.1 in BWK 22 (1970), Nr.2, S.90/95

PROF. DR.-ING. HABIL. LOTHAR ROUVEL
FACHGEBIET ENERGIETECHNIK UND -VERSORGUNG · THERMISCHE GEBÄUDESIMULATION

SÄULINGSTRASSE 4
80686 MÜNCHEN

TEL.: 089-576804 FAX: 089-5706641
ROUVEL@GEBSIMU.DE WWW.GEBSIMU.DE

