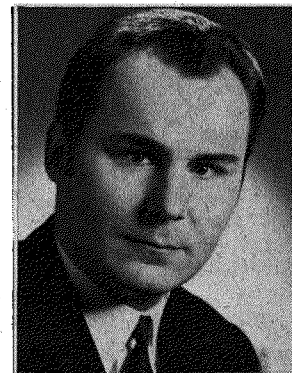


DK 536.68:697.13:621.317.385:697.27.003

Zusammenhänge zwischen Wärmebedarf und Klimadaten in einer allelektrischen Siedlung

Von L. Rouvel, Karlsruhe*)

Zur Bestimmung des Einflusses der Außentemperatur, der Windgeschwindigkeit und der Sonnenintensität auf den Heizwärme- und den Heizleistungsbedarf wurden in einer Siedlung mit elektrischer Direktheizung der Stromverbrauch und die meteorologischen Daten als integrierte Viertelstundenwerte während der Heizperiode 1967/68 gemessen. Der Heizstrom- und der sonstige Haushaltstromverbrauch wurden gesondert erfaßt. Außerdem wurde bei der Messung zwischen dem Bedarf der verschiedenen Haustypen und dem eines einzelnen Wohnzimmers unterschieden. Mit Hilfe der mathematischen Statistik werden die Abhängigkeiten des Heizwärme- und des Heizleistungsbedarfs von den verschiedenen Witterungseinflüssen ermittelt. Die Ergebnisse werden mit den Berechnungsregeln für den Wärmebedarf nach DIN 4701 und den Richtlinien zur Berechnung des Wärmeverbrauchs nach VDI 2067 verglichen.



Voraussetzungen für eine Leistungsanalyse

Das Vordringen der leitungsgebundenen Energieträger Strom und Gas auf dem Gebiet der Wohnraumbeheizung wird in steigendem Maße die Belastungsverhältnisse der Erzeugungs-, Fortleitungs- und Verteilungsanlagen verändern. Die Wirtschaftlichkeit der Raumheizung mit Edelenergien wird davon natürlich beeinflusst. Sie hängt aber gleichermaßen auch von der richtigen dem Raumwärmebedarf und seinem Leistungsgang angepaßten Auslegung der Heizanlagen ab.

Es ist heute offensichtlich, daß die bisherigen Berechnungsgrundlagen für die Auslegung von Heizanlagen und für die Ermittlung des jährlichen Heizenergiebedarfs den tatsächlichen Verhältnissen oft nicht gerecht werden. Über die Fragen des Leistungsgangs und seiner Abhängigkeit von den meteorologischen Daten und der Bauweise gibt es zur Zeit keine für unsere Verhältnisse gültigen Aussagen.

Grundlage derartiger Aussagen können nur Leistungsanalysen an einheitlich gebauten und ausgerüsteten Wohnungen sein, wobei zur Eliminierung der subjektiven Unterschiede die Zahl der gemeinsam erfaßten Wohnungen nicht zu klein sein sollte.

Belastungsuntersuchungen von Objekten mit elektrischer Speicherheizung lassen wegen der Wärmespeicherung keine Schlüsse zu. Belastungsuntersuchungen gasbeheizter Objekte scheitern am hohen Meßaufwand, der notwendig ist, um Heiz- und Haushaltgasverbrauch zu trennen; eine rechnerische Trennung ist in gewissem Umfang möglich,

birgt jedoch hohe Unsicherheiten. Bei Objekten, die mit Fernwärme versorgt werden, tritt ebenso wie beim Gas das Problem auf, den Nutzungsgrad der eingespeisten Energieträger einwandfrei zu ermitteln. Zudem tritt bei der Fernwärme eine zeitliche Verschiebung zwischen Wärmezeugung und -verbrauch auf.

Die sicherste Möglichkeit, den Heizleistungsgang und den Heizwärmebedarf eindeutig zu bestimmen, bieten Objekte mit elektrischer Direktheizung. Die hierbei gemessenen elektrischen Arbeiten und Leistungen sind identisch mit dem Heizbedarf. Bei gleichzeitiger Erfassung des zeitlichen Gangs der Außentemperatur, der Windgeschwindigkeit und der Sonnenintensität lassen sich dann mit den Methoden der mathematischen Statistik die gesuchten Zusammenhänge ermitteln.

In Erkenntnis dieses Tatbestandes entschloß sich ein Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EVU) im nordrhein-westfälischen Raum, eine Neubausiedlung ausschließlich mit Direktheizung auszurüsten. Um Heiz- und Haushaltbedarf getrennt erfassen zu können, wurden von der versorgenden Station aus die Häuser über je zwei Kabel angeschlossen. Die FfE erhielt den Auftrag, die notwendigen Meßanlagen zu projektieren, zu installieren und über einen Zeitraum von drei Jahren die Messungen durchzuführen und auszuwerten. Schon die Auswertung der Messungen des ersten Jahres, über die im folgenden berichtet wird, zeigt, daß der sehr erhebliche Aufwand durch die neuen Erkenntnisse gerechtfertigt ist.

Beschreibung der Siedlung

Die Siedlung soll im Endausbau 55 Wohnhäuser umfassen. Während der Heizperiode 1967/68 wurden hiervon 22 zweistöckige Reihenhäuser und 28 Bungalows bewohnt.

*) Dipl.-Ing. Lothar Rouvel, Forschungsstelle für Energiewirtschaft an der Universität (TH) Karlsruhe.

Die Untersuchungen wurden dank einer großzügigen finanziellen Unterstützung der Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk AG, Essen, ermöglicht.

Der allgemeine Haushaltstromverbrauch für die 50 Wohneinheiten (WoE) wurde gemeinsam gemessen. In ihm ist auch die Warmwasserbereitung enthalten, die in jeder WoE getrennt mit einem Warmwasserspeicher von 400 ltr. Inhalt durchgeführt wird. Die Anschlußleistung beträgt je 6 kW. Das Wasser wird nachts nach 23 Uhr erwärmt, um einen Ausgleich für die Raumheizung zu erhalten, die hauptsächlich am Tage in Betrieb ist. Der Heizenergiebedarf konnte auf zwei Gruppen aufgeteilt werden, und zwar:

- a) 22 Bungalows (BU)
- b) 22 Reihenhäuser (RH) und 6 Bungalows (BU)

Zur vereinfachten Schreibweise wird entsprechend den dominierenden Haustypen die Gruppe a) mit Bungalows und die Gruppe b) mit Reihenhäuser bezeichnet.

Für die beiden Gruppen ist in **Zahlentafel 1** eine Übersicht über die Wohnflächen, den Wärmebedarf nach DIN 4701 und die installierte elektrische Heizleistung gegeben. Zusätzlich ist noch zu berücksichtigen, daß je WoE eine Garage vorhanden ist, die mit je einem Heizgerät von 1 kW ausgerüstet ist. Diese Geräte werden in den weiteren Betrachtungen außer acht gelassen.

Der Aufbau der Außenwände ist in der gesamten Siedlung gleich und besteht aus 2 cm Innenputz, 24 cm KSL-Mauerwerk, 3 cm Styropor und 11,5 cm Verblendmauerwerk. Die Fenster sind einfachverglast mit Ausnahme der Terrassenfenster und -türen im Wohnzimmer, die eine Isolierverglasung haben. Die Dächer sind als Flachdächer ausgeführt. Die Gebäude sind nicht unterkellert. Unter dem Erdgeschoß befindet sich nur ein Montageschacht. Als mittlere Wärmedurchgangszahl k für die gesamten Außenflächen des Hauses errechnet sich für die Reihenhäuser (Innenlage) ein Wert von 1,0 kcal/m² h grd und für die Bungalows etwa 0,82 kcal/m² h grd. Der Wert für die Bungalows schwankt etwas, je nach dem Grundriß.

Zahlentafel 1. Aufstellung über Wohnflächen, Wärmebedarf und installierte Heizleistung.

	Anzahl der Wohneinheiten (WoE)	Wohnfläche		Wärmebedarf nach DIN 4701		Installierte Heizleistung	
		m ²	m ² WoE	kcal/h	kcal/m ² h	kW	kW/m ²
Bungalows	22	3 202	145,5	322 830	101	478	0,149
Reihenhäuser	28	3 960	141,5	360 300	91	538	0,136
Gesamt-siedlung	50	7 162	143,5	683 130	95,5	1 016	0,142

Der mittlere k -Wert der Reihenhäuser ist wegen des prozentual größeren Fensteranteils und dem etwas geringeren Dachanteil — das Dach ist gut wärmegeklämt — trotz gleicher Bauweise größer als der der Bungalows. Da jedoch die Außenfläche, bezogen auf die Wohnfläche, bei den Reihenhäusern wesentlich kleiner ist als bei den Bungalows, ist der Wärmebedarf je m² Wohnfläche trotzdem niedriger.

Die Heizung wird in jedem Zimmer getrennt über einen Raumthermostat geregelt. Während der Nacht kann die Raumtemperatur zentral für die gesamte Wohnung über eine Zeitschaltuhr um rd. 6 grd abgesenkt werden.

Anordnung der Meßstellen in einem Wohnraum

Um einen Vergleich zur Messung der gesamten Siedlung zu erhalten, wurde gleichzeitig noch der Wärmebedarf eines Wohnzimmers in einem Bungalow erfaßt. Der Raumthermostat dieses Wohnraumes wurde auf 22 °C eingestellt und arretiert, um eine definierte Beheizung zu erhalten. Die angrenzende Eßdiele ist durch eine zweiflügelige Tür vom Wohnraum getrennt. Diese Tür ist meistens geöffnet. Um zu vermeiden, daß ein Raum den anderen mitheizt, wurde der Thermostat in der Eßdiele ebenfalls auf 22 °C eingestellt.

Den Bewohnern war es also nicht möglich, die Temperatur beider Räume zu verändern. Die zentrale Temperaturabsenkung während der Nacht konnte dagegen von den Hausbewohnern auch für Wohnzimmer und Eßdiele eingeschaltet werden. Zum Reinigen und Lüften des Raumes

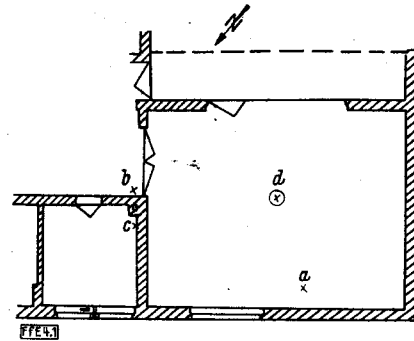


Bild 1. Grundriß des Wohnzimmers.

Temperaturmeßstellen:

- a Wohnzimmer
- b Thermostat in der Eßdiele
- c Küchenwand
- d Montageschacht (unter dem Wohnzimmer)

konnte die Heizung kurzzeitig ausgeschaltet werden. Der Grundriß des Wohnzimmers und die einzelnen Temperaturmeßstellen sind aus **Bild 1** zu ersehen.

Der Wärmebedarf Q_h des Wohnraumes von 43,3 m² errechnet sich nach DIN 4701 zu 3860 kcal/h bzw. zu 4,5 kW. In Abhängigkeit von der Außentemperatur ϑ_a läßt sich auch schreiben:

$$Q_h = 0,32 + 0,131 (20^\circ\text{C} - \vartheta_a) \text{ in kW} \dots (1)$$

Die installierte Heizleistung beträgt 6,2 kW.

Gemessene Größen

Um fundierte Aussagen über die Abhängigkeit des Wärme- und des Leistungsbedarfs für die Heizung von den außenklimatischen Einflußfaktoren gewinnen und außerdem noch den Leistungsgang des allgemeinen Stromverbrauchs ermitteln zu können, wurden für die gesamte Siedlung folgende Größen als viertelstündliche Integralwerte gemessen:

- 1) Allgemeiner Haushaltstromverbrauch der 50 WoE,
- 2) Heizstromverbrauch der Bungalows (22 BU),
- 3) Heizstromverbrauch der Reihenhäuser (22 RH + 6 BU),
- 4) Außentemperatur,
- 5) Windgeschwindigkeit,
- 6) Sonnenintensität.

Für die Untersuchung des Wohnzimmers wurden als Viertelstundenwerte erfaßt:

- 1) Heizstromverbrauch für das Wohnzimmer,
- 2) Allgemeiner Stromverbrauch für das Wohnzimmer,
- 3) Raumtemperatur im Wohnzimmer,
- 4) Temperatur am Thermostaten in der Eßdiele,
- 5) Küchenwandtemperatur,
- 6) Temperatur im Montageschacht unter dem Wohnzimmer

Art und Aufbau der Meßgeräte

Da die festzustellenden Zusammenhänge und Abhängigkeiten auf keinen Fall funktional, sondern stochastisch miteinander verknüpft sind, ist es notwendig, bei der Auswertung der Messungen auch Methoden der mathematischen Statistik einzusetzen.

Um die Auswertung mit vertretbarem Aufwand durchzuführen, mußte man Meßgeräte und Meßwertgeber einsetzen, die es gestatten, mit den anfallenden Meßwerten ohne weitere Umsetzung Rechenmaschinen anzusteuern. Es kamen daher nur digital registrierende Geräte in Frage, die die Meßwerte in den normalen Fernschreibkode umsetzen und auf Lochstreifen auslochen. Für die hier vorliegende Aufgabe wurde ein spezielles Datenerfassungs-

gerät mit Meßwertlocher entwickelt, das es gestattet, mit einem einzigen Locher die Meßwerte von sechs Meßstellen zu erfassen.

Alle Meßstellen sind mit drei Dekaden ausgerüstet, wozu noch die Kennzeichnung der Meßstelle kommt. Drei weitere Dekaden dienen zur Kennzeichnung des Datums (laufende Nummer der Woche und Numerierung der Tage), zwei Dekaden zur Kennzeichnung der jeweiligen Viertelstunde am Tag. Der Meßwertlocher ist so ausgelegt, daß die genaue Meßzeit 14 min und 57 s beträgt. Innerhalb von 3 s werden die Meßwerte abgefragt und ausgelocht. Das Zeit- und Datumwerk läuft auch bei Stromausfall weiter; außerdem wird jede Meßperiode besonders gekennzeichnet, in der durch Stromausfall überhaupt nicht oder nur während eines Teils der Meßperiode gemessen wurde.

Für den Energie- und Leistungsbedarf sind als Meßwertgeber Wirkarbeitszähler mit digitalem Ausgang eingesetzt. Alle Temperaturen werden mit Platinwiderstandsthermometern und nachgeschalteten Analog/Digital-Wandlern eigener Konstruktion gemessen. Die Windgeschwindigkeit wird mit einem Schalen-Anemometer mit digitalem Ausgang erfaßt. Zur Messung der Sonnenintensität wurde ebenfalls ein eigenes Meßgerät entwickelt, da es z. Z. auf dem Markt kein geeignetes Gerät gibt.

Die Sonneneinstrahlung wird als Temperaturdifferenz zwischen zwei Platinwiderstandsthermometern erfaßt, von denen das eine versilbert, das andere graphitisiert ist. Um den Einfluß von Windgeschwindigkeit und Luftfeuchtigkeit auszuschließen, wurden beide Widerstandsgeber in einen evakuierten Glaskolben eingeschmolzen. Durch senkrechte Anordnung der zylindrischen Widerstände wird der Sonneneinfall auf eine senkrechte Fläche, z. B. Wand oder Fenster, erfaßt, und zwar unabhängig vom Sonnenstand. Wie Versuche gezeigt haben, ist die Widerstandsdifferenz und damit auch die Temperaturdifferenz zwischen beiden Meßfühlern linear mit der Sonneneinstrahlung verknüpft. Eine Eichung der Temperaturdifferenz (grd) auf eingestrahelte Sonnenwärme ($\text{kcal/m}^2 \text{ h}$) konnte jedoch noch nicht durchgeführt werden. Die Größenordnung läßt sich jedoch aus dem Vergleich zwischen den gemessenen Extremwerten und den in der Literatur angegebenen Werten abschätzen.

Die höchsten gemessenen Temperaturdifferenzen betragen für die Untersuchungszeit rd. 18 grd, die höchsten Tagesmittelwerte etwa 6 grd. Nach Cammerer¹⁾ ergeben sich für die gleiche Jahreszeit maximale Sonnenstrahlungswerte zwischen 550 und 650 $\text{kcal/m}^2 \text{ h}$ bzw. zwischen 220 und 310 $\text{kcal/m}^2 \text{ h}$.

Heizwärmebedarf und meteorologische Daten

Außentemperatur

Die Haupteinflußgröße auf den Heizwärmebedarf ist die Außentemperatur. Um einen Überblick über diesen Zusammenhang zu erhalten, ist in Bild 2 der tägliche Heizstromverbrauch der Gesamtsiedlung über der Tagesmitteltemperatur aufgetragen. Die Tagesmitteltemperatur ist dabei nicht, wie bei den meteorologischen Angaben üblich, aus einem gewichteten Mittel der Außentemperaturen um 6, 12 und 21 Uhr errechnet, sondern stellt den effektiven Mittelwert über 24 Stunden dar.

Die einzelnen Werte in Bild 2 streuen stark; bei gleichen Temperaturen ergeben sich Unterschiede bis zu 4 000 kWh/d. In dieses Bild könnte man auch die „Stempel-Kurve“ einzeichnen, d. h. bei tieferen Außentemperaturen nimmt der Wärmebedarf je grd weniger zu als bei höheren Außentemperaturen. Bei Aufteilung der Werte in mehrere Zeitabschnitte während des Winters zeigt sich jedoch, daß diese Annahme nicht stimmt. Vielmehr tritt in der Übergangszeit (Mitte Oktober bis Mitte November und Ende

März bis Ende Mai) bei gleichen Außentemperaturen ein geringerer Wärmebedarf auf als im Winter.

Noch deutlicher wird diese Tendenz, wenn der tägliche Wärmestromverbrauch der Siedlung nicht über der Tagesmitteltemperatur, sondern über der Mitteltemperatur von zwei Tagen (Zweitagesmitteltemperatur) aufgetragen wird, Bild 3. Gleichzeitig verringert sich auch die Streuung wesentlich. Dies deutet darauf hin, daß der Zusammenhang zwischen Heizwärmebedarf und Außentemperatur nicht nur

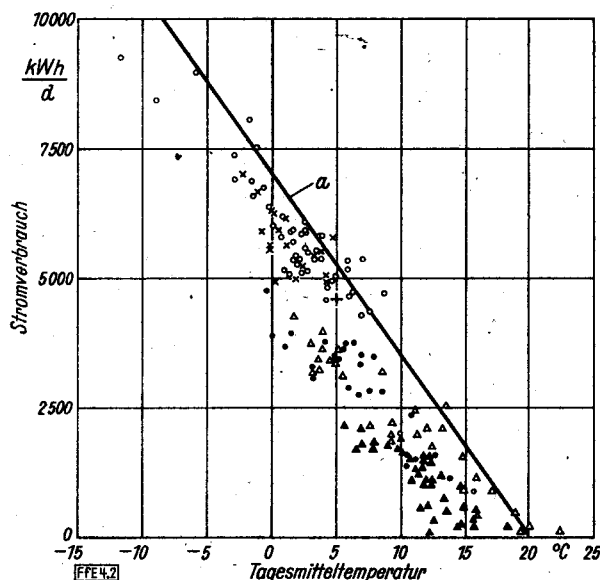
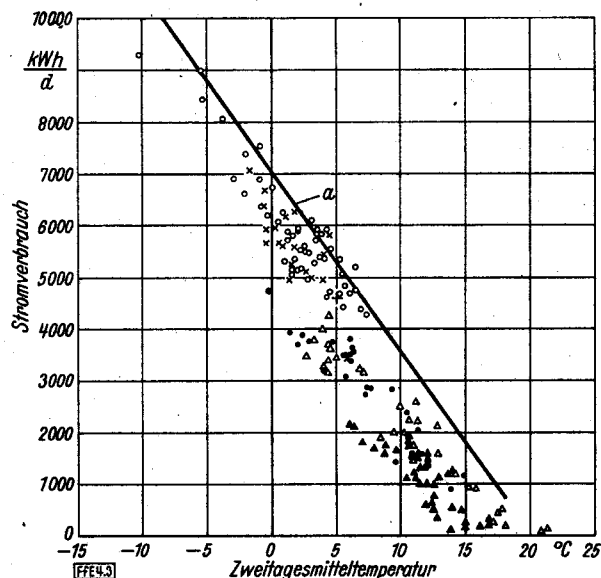


Bild 2. Täglicher Wärmestromverbrauch der Gesamtsiedlung.

a Täglicher Wärmebedarf Q_a nach VDI 2067

- 19. Oktober bis 18. November 1967
- × 19. November bis 9. Dezember 1967
- 10. Januar bis 23. März 1968
- △ 24. März bis 22. April 1968
- ▲ 23. April bis 31. Mai 1968
- + Mittlerer Verbrauch vom 6. 10. 1967 bis zum 8. 4. 1968

Bild 3. Täglicher Wärmestromverbrauch der Gesamtsiedlung.



durch die Tagesmitteltemperatur des betrachteten Tages sondern auch durch die Außentemperatur des Vortages bzw. der Vortage beeinflusst wird. Welcher Ansatz die Abhängigkeiten am genauesten beschreibt, kann jedoch erst festgestellt werden, wenn außer der Außentemperatur auch die Windgeschwindigkeit und die Sonnenintensität mit in die Betrachtung einbezogen werden.

¹⁾ Cammerer, J. S.: Wärme- und Kälteschutz in der Industrie. 4. Aufl. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer 1962, s. bes. S. 40 ff.

Vorab sei schon darauf hingewiesen, daß ein Einfluß der Luftfeuchtigkeit auf den Wärmebedarf nicht ermittelt werden konnte und die Luftfeuchtigkeit deshalb in den weiteren Betrachtungen nicht berücksichtigt wird.

Ansatz für die Regressionsanalyse

Zur Ermittlung der Abhängigkeiten wurde eine Regressionsanalyse durchgeführt. Dabei mußten Ansätze gefunden werden, die physikalisch sinnvolle und mathematisch befriedigende Aussagen über den Zusammenhang zwischen dem Heizwärmebedarf und den meteorologischen Daten liefern.

Für die Regressionsrechnung wurde deshalb folgender Ansatz gewählt:

$$A_H = A_0 + a_{\Delta\vartheta} \Delta\vartheta + a_{(v\Delta\vartheta)} (v\Delta\vartheta) + a_{I_S} I_S \quad (2)$$

Hierin bedeuten:

A_H	täglicher Heizwärmeverbrauch in kWh/d,
A_0	täglicher Konstantanteil in kWh/d,
$\Delta\vartheta$	Differenz zwischen 20 °C Innenraumtemperatur und dem Mittel ϑ^* aus mehreren Tagesmitteltemperaturen in grd,
$(v\Delta\vartheta)$	Tagesmittel aus dem Produkt der Viertelstundenwerte von der Windgeschwindigkeit in m/s und der Differenz von der Raumtemperatur und der Außentemperatur in grd,
I_S	Tagesmittel der Sonnenintensität in grd,
$a_{\Delta\vartheta}$	Regressionskoeffizient für $\Delta\vartheta$ in kWh/d grd,
$a_{(v\Delta\vartheta)}$	Regressionskoeffizient für $(v\Delta\vartheta)$ in kWh/d m grd,
a_{I_S}	Regressionskoeffizient für I_S in kWh/d grd.

Zweckmäßigerweise rechnet man mit der Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Außentemperatur, wenn der Einfluß der Außentemperatur ermittelt werden soll. Als mittlere Raumtemperatur wird ein Wert von 20 °C eingesetzt, wobei unterstellt wird, daß über 16 Stunden, von 6 bis 22 Uhr, 22 °C und über 8 Stunden, von 22 bis 6 Uhr, 16 °C gefordert werden. Diese Festlegung ist in gewissem Umfang willkürlich, wirkt sich jedoch nur auf den Konstantanteil aus und verändert nicht das Ergebnis der Rechnung.

Der Einfluß der Windgeschwindigkeit v wird physikalisch am besten in Form des Produktes $v\Delta\vartheta$ erfaßt, wobei für die Raumtemperatur wieder der obige Ansatz gilt. Er ist mathematisch problematisch, da zwischen dem Wert $\Delta\vartheta$ und dem Faktor $\Delta\vartheta$ eine Multikollinearität gegeben ist.

Für das Mittel ϑ^* von mehreren Tagesmitteltemperaturen wurden 6 verschiedene Kombinationen gewählt:

- 1) $\vartheta^* = \vartheta_n$,
- 2) $\vartheta^* = \frac{\vartheta_n + \vartheta_{n-1}}{2}$,

$$3) \quad \vartheta^* = \frac{2\vartheta_n + \vartheta_{n-1}}{3}$$

$$4) \quad \vartheta^* = \frac{\vartheta_n + 2\vartheta_{n-1}}{3}$$

$$5) \quad \vartheta^* = \frac{\vartheta_n + \vartheta_{n-1} + \vartheta_{n-2}}{3}$$

$$6) \quad \vartheta^* = \frac{\vartheta_n + 2\vartheta_{n-1} + \vartheta_{n-2}}{4}$$

Dabei bedeuten die Indices:

- n der betrachtete Tag,
- $n - 1$ der Vortag,
- $n - 2$ der Vorvortag.

Für den Zeitraum vom 10. Januar bis zum 23. März (unter Ausschuß einiger Tage, für die nicht alle Werte vorliegen) sind in der **Zahlentafel 2** das Bestimmtheitsmaß B und die halbseitige Streubandbreite ΔA_H der Regressionsgleichungen für den täglichen Heizwärmeverbrauch, sowohl der Gesamtsiedlung wie auch des einzelnen gemessenen Wohnzimmers, in Abhängigkeit von den sechs verschiedenen Mitteltemperaturen angegeben.

Es ist ersichtlich, daß die Rangfolge der Aussagegüte der Regressionsgleichungen für beide Objekte gleich ist. An erster Stelle steht der schon bei der graphischen Auswertung ermittelte Ansatz mit der Zweitagesmitteltemperatur. Der Ansatz mit der Dreitagesmitteltemperatur, bei der der Vortag doppelt gewichtet ist, unterscheidet sich von dem ersteren hinsichtlich seiner Genauigkeit nur geringfügig. Alle anderen Gleichungen geben den Zusammenhang zwischen dem täglichen Wärmebedarf und der Außentemperatur, der Windgeschwindigkeit und der Sonnenintensität wesentlich schlechter wieder.

Ergebnisse

Für die endgültige Analyse ist deshalb die Zweitagesmitteltemperatur $\vartheta'' = \frac{\vartheta_n + \vartheta_{n-1}}{2}$ eingesetzt worden, um den Einfluß der Außentemperatur, der Windgeschwindigkeit und der Sonnenintensität auf den täglichen Heizwärmeverbrauch zu erkennen. Für das Wohnzimmer wird als Innenraumtemperatur statt 20 °C die zusätzlich gemessene Mitteltemperatur berücksichtigt.

Zum Vergleich mit der Dreifachregressionsanalyse wurde noch zusätzlich eine Einfachregressionsanalyse durchgeführt, bei der nur die Tagesmitteltemperatur $\vartheta' = \vartheta_n$ verwendet wurde. Dieser Ansatz wird in den meisten Fällen zur Bestimmung des Wärmebedarfs gewählt.

Die Ergebnisse der Dreifach- und Einfachregressionsrechnungen für die Gesamtsiedlung, die Bungalows, die Reihenhäuser und das Wohnzimmer sind getrennt für

Zahlentafel 2. Bestimmtheitsmaß und halbseitige Streubandbreite der Regressionsgleichungen für den täglichen Heizwärmeverbrauch der Gesamtsiedlung und des Wohnzimmers.

Mitteltemperatur ϑ^*	Gesamtsiedlung*)		Wohnzimmer**)		Rangfolge
	Bestimmtheitsmaß B %	Halbseitige Streubandbreite ΔA_H kWh/d	Bestimmtheitsmaß B %	Halbseitige Streubandbreite ΔA_H kWh/d	
ϑ_n	88,2	780	82,7	5,36	3
$\frac{\vartheta_n + \vartheta_{n-1}}{2}$	92,2	632	85,9	4,83	1
$\frac{2\vartheta_n + \vartheta_{n-1}}{3}$	83,5	913	74,8	6,46	5
$\frac{\vartheta_n + 2\vartheta_{n-1}}{3}$	87,5	793	79,5	5,83	4
$\frac{\vartheta_n + \vartheta_{n-1} + \vartheta_{n-2}}{3}$	46,8	1 638	41,3	9,86	6
$\frac{\vartheta_n + 2\vartheta_{n-1} + \vartheta_{n-2}}{4}$	92,0	635	84,5	5,06	2

*) Mittlerer täglicher Wärmebedarf $\overline{A_H} = 5 880$ kWh/d

**) Mittlerer täglicher Wärmebedarf $\overline{A_H} = 46,12$ kWh/d

Zahlentafel 3. Aufstellung über die Regressionsanalyse zur Bestimmung des Einflusses der außerklimatischen Faktoren auf den täglichen Heizwärmeverbrauch.

Zeitspannen im Jahre 1968	Dreifachregression										Einfachregression			
	A_0	$a_{\Delta\vartheta''}$	$a_{(v\Delta\vartheta)}$	$a_{IS'}$	B	ΔA_H	$\Delta a_{\Delta\vartheta''}$	$\Delta a_{(v\Delta\vartheta)}$	$\Delta a_{IS'}$	A_0	$a_{\Delta\vartheta'}$	B	ΔA_H	$\Delta a_{\Delta\vartheta'}$
	kWh/d	kWh/d grd	kWh/d m grd	kWh/d grd	%	kWh/d	kWh/d grd	kWh/d m grd	kWh/d grd	kWh/d	kWh/d grd	%	kWh/d	kWh/d grd
Gesamt- Siedung														
10. Januar bis 23. März	194,7	294,94	11,28	-155,74	92,2	632	28,3	4,50	58,9	990,8	270,82	80,3	986	38,6
24. März bis 22. April	396,7	238,40	-3,26	-84,29	93,3	682	36,4	5,58	133,5	323,4	197,77	90,2	790	25,7
23. April bis 31. Mai	210,2	136,73	15,57	-146,56	80,0	505	33,8	9,10	65,8	-309,0	167,81	69,4	695	36,0
10. Januar bis 22. April	661,1	313,84	-1,99	-277,25	93,9	1025	25,2	5,03	62,7	-286,8	320,04	84,7	1603	30,6
24. März bis 31. Mai	-437,3	186,87	9,37	28,08	82,4	946	37,6	5,97	89,0	-281,7	206,88	72,4	1140	30,8
10. Januar bis 31. Mai	-331,6	332,83	5,66	-256,20	91,8	1355	29,2	6,18	74,8	-1276,2	362,74	84,3	1860	28,4
Bungalows														
10. Januar bis 23. März	598,1	130,44	6,09	-76,07	86,9	382	17,1	2,72	35,6	973,2	121,11	74,0	527	20,6
24. März bis 22. April	361,4	142,63	-3,60	-68,65	92,4	412	22,0	3,37	80,6	242,7	110,41	87,1	515	16,7
23. April bis 31. Mai	119,2	82,74	10,33	-81,95	84,2	319	22,3	6,00	43,4	-149,9	100,85	65,0	463	25,9
10. Januar bis 22. April	547,6	157,03	-0,72	-146,24	93,6	535	13,2	2,63	32,8	52,0	161,77	94,1	830	15,8
24. März bis 31. Mai	-179,4	113,44	3,94	6,87	81,0	547	22,3	3,53	52,6	-96,4	117,03	71,3	661	17,9
10. Januar bis 31. Mai	-21,9	169,62	3,41	-133,96	91,8	606	15,0	3,18	35,6	-513,9	186,50	83,9	969	14,8
Reihen- häuser														
10. Januar bis 23. März	-403,7	184,51	5,19	-79,80	91,2	370	16,6	2,64	34,5	17,5	149,71	80,5	541	21,2
24. März bis 22. April	34,8	95,77	0,34	-15,59	91,9	380	17,8	2,70	64,7	80,6	87,38	90,7	338	11,0
23. April bis 31. Mai	91,9	53,86	5,25	-64,62	84,3	200	14,0	3,75	27,2	-158,4	66,88	72,6	256	13,3
10. Januar bis 22. April	113,7	156,80	-1,28	-131,05	92,1	583	14,3	2,83	35,7	-318,9	158,27	83,4	810	15,9
24. März bis 31. Mai	-257,7	73,39	5,46	21,24	81,9	410	16,7	2,65	39,4	-185,2	89,84	71,3	507	13,8
10. Januar bis 31. Mai	-309,4	163,19	2,25	-122,25	90,4	716	15,4	3,27	39,6	-762,2	176,20	83,4	936	14,3
Wohn- zimmer														
10. Januar bis 23. März	14,49	1,625	0,0538	-0,898	85,7	4,90	0,242	0,0376	0,485	21,30	1,385	75,5	6,23	0,245
24. März bis 22. April	8,09	1,872	-0,0234	-1,534	71,0	8,75	0,683	0,0767	1,823	8,22	1,369	68,0	8,70	0,414
23. April bis 31. Mai	7,26	2,605	0,0990	-1,891	74,1	7,25	0,717	0,1370	1,230	-5,01	2,206	65,9	8,03	0,583
10. Januar bis 22. April	8,11	2,238	-0,0117	-2,321	89,2	8,55	0,255	0,0438	0,517	4,84	2,128	73,7	12,60	0,312
24. März bis 31. Mai	-2,94	2,211	0,0385	-0,835	71,0	9,05	0,550	0,0615	1,160	0,03	1,854	67,0	9,45	0,351
10. Januar bis 31. Mai	-2,18	2,587	0,0416	-2,220	90,5	9,40	0,252	0,0451	0,550	-4,74	2,609	81,2	13,09	0,241

einzelne Zeitabschnitte der Heizperiode in **Zahlentafel 3** zusammengestellt. Entsprechend der bereits in Bild 2 und 3 vorgenommenen zeitlichen Aufteilung erfolgt auch hier die Berechnung getrennt für die Zeiträume im Jahre 1968:

10. Januar bis 23. März; 24. März bis 22. April; 23. April bis 31. Mai.

Außerdem werden diese drei Zeiträume so zusammengefaßt:

10. Januar bis 22. April; 24. März bis 31. Mai; 10. Januar bis 31. Mai.

Eine Analyse für das erste Winterhalbjahr war nicht möglich, da für diese Zeit die einzelnen Meßwerte nicht vollständig sind.

Zur Bestimmung und Beurteilung der einzelnen Gleichungen sind in **Zahlentafel 3** folgende Werte zusammengestellt:

Konstantanteil A_0 ,

Regressionskoeffizienten a ,

Bestimmtheitsmaß B ,

Halbseitige Streubandbreite ΔA_H ,

Varianz der Regressionskoeffizienten Δa .

Aus der Aufstellung ist deutlich zu entnehmen, daß sich die Gleichung für die einzelnen Zeiträume stark unterscheiden. Die mathematischen Prüfmethode ergaben fast überall signifikante Unterschiede. Diese Tendenz war bereits bei der graphischen Auswertung mit nur einem Parameter (Außentemperatur) erkennbar.

Es liegt daher zunächst die Folgerung nahe, daß sich der relativ geringere Heizwärmebedarf in der Übergangszeit aus den Heizgewohnheiten, der Bewohner erklären läßt. Dieser Annahme widerspricht jedoch, daß bei dem Wärmebedarf des Wohnzimmers, in dem der Raumthermostat arretiert war, die gleichen Tendenzen festzustellen sind. Als weitere Ursache kommen unterschiedliche Zusammenhänge zwischen den klimatischen Faktoren in Betracht. Die Mittelwerte in den einzelnen Zeiträumen zeigt **Zahlentafel 4**.

Im ersten Zeitraum ist die Sonnenintensität relativ gering, im zweiten liegen die Werte für Wind und Sonnenintensität sehr hoch, während im dritten Abschnitt die Windgeschwindigkeit unter dem Durchschnittswert liegt. Da die Regressionsanalyse nicht die physikalischen Abhängigkeiten beschreibt, sondern eine Veränderung der abhängigen Variablen durch die Veränderungen der unabhängigen Variablen mathematisch optimal erklärt,

Zahlentafel 4. Mittelwerte der klimatischen Faktoren für sechs Zeitabschnitte

Zeitspannen im Jahre 1968	Außen- temperatur °C	Wind- geschwindigkeit m/s	Sonnen- intensität grd
10. Januar bis 23. März	1,9	3,0	1,7
24. März bis 22. April	9,7	4,2	4,6
23. April bis 31. Mai	11,9	2,3	3,3
10. Januar bis 22. April	4,7	3,3	2,8
24. März bis 31. Mai	11,0	3,2	3,8
10. Januar bis 31. Mai	7,2	3,1	2,9

kann eine Verschiebung der Werte in den einzelnen Zeitabschnitten zu verschiedenen Ergebnissen führen. So würde z. B. bei einer konstanten Windgeschwindigkeit die Regressionsrechnung keinen Einfluß des Windes auf den Wärmebedarf ausweisen. Auch kann die mathematische Analyse bei gleichsinniger Veränderung von zwei Parametern, man spricht dann von Multikollinearität, nicht entscheiden, wie die Aufteilung auf die beiden Einflußgrößen vorgenommen werden soll. Dies kann teilweise zutreffen bei der Windgeschwindigkeit und der Sonnenintensität. So wird z. B. für den Zeitraum vom 24. März bis zum 22. April 1968 und vom 10. Januar bis zum 22. April 1968 in den meisten Rechnungen der Einfluß des Windes als Wärmegewinn ausgewiesen, was theoretisch nur für den

Wohnraum möglich ist, falls nämlich aufgrund der Windrichtung die Wohnzimmerfenster und -außenwände nicht angeblasen werden. Zum anderen bewirkt die Sonneneinstrahlung im Zeitraum vom 24. März bis zum 31. Mai 1968 rein rechnerisch für die Siedlung einen erhöhten Wärmeverbrauch. Auch diese Aussage ist physikalisch unsinnig.

Ein Kriterium für die Auswahl ist das Bestimmtheitsmaß B , wie es bereits bei der Ermittlung der geeigneten Tagesmitteltemperatur verwendet wurde. Danach wäre z. B. für das Wohnzimmer die Gleichung für den gesamten Betrachtungszeitraum am zutreffendsten, da dessen Bestimmtheitsmaß besser ist als das für die einzelnen Zeitabschnitte. Mit Einschränkungen gilt dies auch für die Siedlung, die Bungalows und die Reihenhäuser.

Berücksichtigt man jedoch auch die halbseitige Streubandbreite, so stellt sich heraus, daß sie in allen Fällen für den Gesamtzeitraum am größten ist. Da der Erfahrungsbereich und die Anzahl der Meßwerte für die einzelnen Zeiträume unterschiedlich sind, reicht das Bestimmtheitsmaß allein zur Beurteilung des Regressionsansatzes nicht aus. Aus dem Vergleich der Ergebnisse der Einfachregressionen mit denen der Dreifachregressionen ersieht man, daß in jedem Falle das Bestimmtheitsmaß und die Streubandbreite schlechter ist, wenn lediglich der Parameter $\Delta \theta'$ verwendet wird.

Die geringsten Unterschiede ergeben sich für die Zeiträume, in denen bei der Dreifachregression der Einfluß der Windgeschwindigkeit negativ und der Einfluß der Sonnenintensität positiv ausgewiesen sind. Das deutet, wie bereits erwähnt, darauf hin, daß sich hierbei die Auswirkungen dieser beiden Parameter auf den Wärmebedarf größtenteils aufheben und sich dadurch mit mathematisch-statistischen Methoden nicht mehr nachweisen lassen.

Grundsätzlich muß zu den Regressionsansätzen noch folgendes gesagt werden:

- 1) Der Einfluß des Windes wird nur bezüglich der Geschwindigkeit erfaßt, die Windrichtung bleibt unberücksichtigt. Vorzugsweise weht zwar Westwind, kurzfristig können jedoch starke Schwankungen der Windrichtung auftreten. Auch bei Kenntnis der Windrichtung könnte deren Einfluß nur qualitativ angegeben werden; quantitativ ist er formelmäßig nicht zu erfassen.
- 2) Ähnlich verhält es sich bei der Sonnenintensität. Gemessen wurde der Sonneneinfall auf eine senkrecht stehende Wand, die sich entsprechend dem Sonnenstand dreht. Somit werden gleiche Sonnenintensitäten zu unterschiedlichen Tageszeiten gleich gewichtet, obwohl sie unterschiedlichen Einfluß auf den Wärmeverbrauch eines Hauses haben können. Eine Berücksichtigung wäre nur möglich, wenn der Einfluß der Sonne während des Tages bereits bekannt wäre.

Ein weitergehender Aufschluß über die Ursachen des unterschiedlichen Heizwärmebedarfs in den einzelnen Winterperioden wird nach der Auswertung der Messungen für die laufende Heizperiode 1968/69 erwartet.

Trotz der erwähnten Einschränkungen läßt sich aus den Regressionsgleichungen folgern, daß sich der Wärmebedarf bei Erhöhung der Windgeschwindigkeit um 1 m/s etwa um 1,5 bis 2% erhöht, während die Sonneneinstrahlung einen Heizwärmerückgang bedingt, der im Extremfall einer Außentemperaturerhöhung von rd. 4 bis 4,5 grad entspricht.

Vergleich mit VDI 2067

Um außer den rechnerischen Werten auch einen optischen Überblick über die Abhängigkeit des täglichen Heizwärmeverbrauchs von den außerklimatischen Faktoren zu erhalten, ist in Bild 4 für die Bungalows, in Bild 5 für die Reihenhäuser und in Bild 6 für das Wohnzimmer der tägliche Heizstromverbrauch über der Zweitagesmitteltemperatur aufgetragen. Für das Wohnzimmer ist der allgemeine Stromverbrauch in diesem Raum mitenthalten,

da diese Energie in vollem Umfang zur Beheizung beiträgt. Für die Bungalows und die Reihenhäuser sind die unterschiedlichen Zusammenhänge für den Wärmebedarf in den einzelnen Zeiträumen deutlich erkennbar. Dagegen lassen sich für das Wohnzimmer die in der mathematischen Analyse ermittelten systematischen Abweichungen nicht ohne weiteres erkennen.

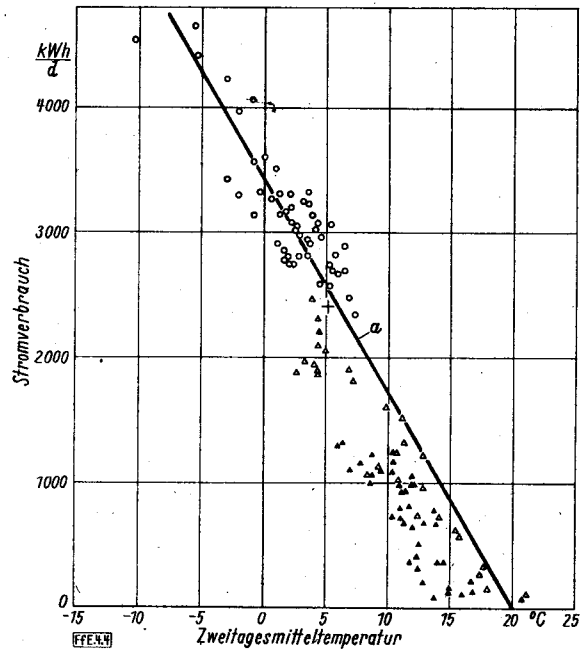
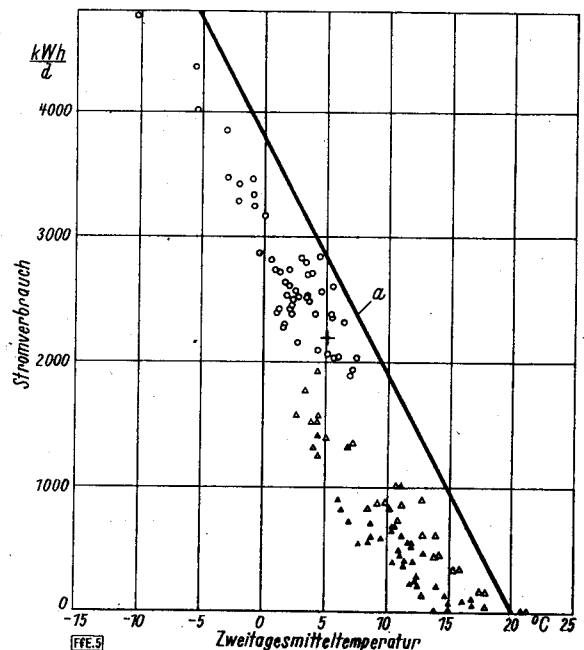


Bild 4. Täglicher Wärmestromverbrauch der Bungalows.
a Täglicher Wärmebedarf Q_a nach VDI 2067

- 19. Oktober bis 18. November 1967
- × 19. November bis 9. Dezember 1967
- 10. Januar bis 23. März 1968
- △ 24. März bis 22. April 1968
- ▲ 23. April bis 31. Mai 1968
- + Mittlerer Verbrauch vom 6. 10. 1967 bis zum 8. 4. 1968

Bild 5. Täglicher Wärmestromverbrauch der Reihenhäuser.



In den Bildern 2 bis 6 ist noch zusätzlich der tägliche Wärmebedarf eingezeichnet, der sich in Anlehnung an die VDI-Richtlinien 2067 errechnet. Diese Richtlinien geben ein Rechenverfahren an, nach dem der Jahreswärmebedarf mit Hilfe des Wärmebedarfs nach DIN 4701 und der durchschnittlichen Gradtagzahl bestimmt werden

Zahlentafel 5. Heizwärmeverbrauch der Siedlung für die Zeit vom 6. Oktober 1967 bis zum 8. April 1968.

	Gesamtverbrauch		Mittelwert		Verbrauch je Wohnungseinheit		Vertrauensbereich des Mittelwertes		Erwartungsbereich des Einzelwertes	
	kWh	kWh/d	kWh/WoE*)	kWh/WoE d	kWh/WoE	kWh/WoE d	kWh/WoE	kWh/WoE d	kWh/WoE	kWh/WoE d
Bungalows	444 012	2 415	20 183	119	18 063 bis 22 303	107,5 bis 130,5	10 283 bis 30 083	65 bis 173		
Reihenhäuser	402 426	2 195	14 372	78	13 352 bis 15 392	72,5 bis 83,5	8 992 bis 19 752	49 bis 107		
Gesamtsiedlung	846 438	4 605	16 929	92	15 576 bis 18 282	84,5 bis 99,5	7 389 bis 26 469	40 bis 144		

*) WoE = Wohnungseinheit

kann. Da sich die Gradtagzahl aus der Anzahl der Heiztage und der Differenz zwischen der mittleren Raumtemperatur und der mittleren Außentemperatur errechnet, ist es auch möglich, den durchschnittlichen täglichen Wärmeverbrauch zu berechnen. Hierdurch wird ein Vergleich mit dem gemessenen täglichen Wärmeverbrauch möglich.

Der tägliche Wärmeverbrauch errechnet sich nach VDI 2067 zu:

$$Q_d = \frac{a e y 24 Q_h (\vartheta_1 - \vartheta_{a \text{ mittel}})}{\vartheta_1 - \vartheta_{a \text{ min}}} \quad (3).$$

Hierin bedeuten:

- $a = 1$ Berichtigungsfaktor,
- $e = 1$ Einschränkungsfaktor,
- $y = 0,6$ Berichtigungs- und Gleichzeitigkeitsfaktor.

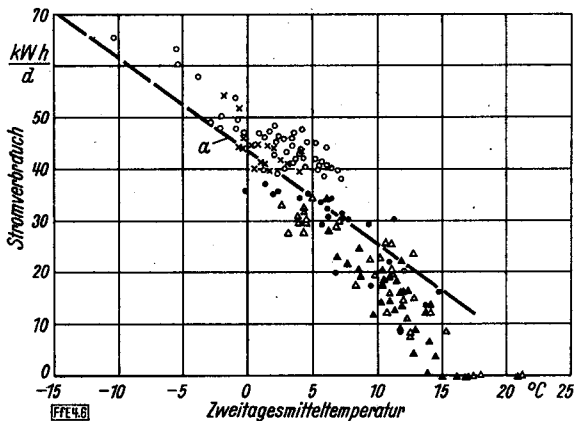


Bild 6. Täglicher Wärmestromverbrauch des Wohnzimmers.

- a Täglicher Wärmebedarf Q_d nach VDI 2067
- 19. Oktober bis 18. November 1967
- × 19. November bis 9. Dezember 1967
- 10. Januar bis 23. März 1968
- △ 24. März bis 22. April 1968
- ▲ 23. April bis 31. Mai 1968
- + Mittlerer Verbrauch vom 6. 10. 1967 bis zum 8. 4. 1968

Diese Formel ist für die Betrachtung eines Zimmers jedoch nicht exakt, da hierbei im Wärmebedarf Q_h ein von der Außentemperatur unabhängiger Konstantanteil enthalten ist. Deshalb wird der Ausdruck

$$\frac{Q_h (\vartheta_1 - \vartheta_{a \text{ mittel}})}{\vartheta_1 - \vartheta_{a \text{ min}}}$$

durch die für den Wohnraum bereits angegebene Gleichung

$$Q_h = 0,32 + 0,131 (20^\circ\text{C} - \vartheta_a)$$

ersetzt.

Der tägliche Wärmebedarf Q_d errechnet sich hiermit zu

$$Q_d = 4,6 + 1,885 \cdot (20^\circ\text{C} - \vartheta_a) \text{ in kWh/d} \quad (4).$$

Außerdem ist in den Bildern 2 bis 5 noch der mittlere Wärmeverbrauch in der Zeit vom 6. 10. 1967 bis zum 8. 4. 1968 angegeben. Er wurde aus den Zählerablesungen des EVU in den einzelnen Haushalten ermittelt. Die dazugehörige mittlere Außentemperatur ist den Berichten des Klimaschnelldienstes des Deutschen Wetteramtes in Offenbach entnommen. Da jedoch keine direkten Angaben für die Siedlung vorliegen, wurde ein Mittel aus den Temperaturwerten von drei umliegenden Großstädten gebildet. Die eingesetzte mittlere Temperatur kann daher nur als Anhalt dienen. Eine zahlenmäßige Aufstellung ist in **Zahlentafel 5** enthalten. Dabei wird außer dem Gesamtverbrauch, dem mittleren Verbrauch je WoE auch der Vertrauensbereich des Mittelwertes und der Erwartungsbereich der Einzelwerte für eine statistische Sicherheit von 95% angegeben.

Ein Vergleich zwischen dem tatsächlichen Verbrauch und dem rechnerischen Wärmeverbrauch nach VDI 2067 kann nach den Bildern 2 bis 6 gezogen werden. Die beste Übereinstimmung ergibt sich für die Bungalows, Bild 4. Jedoch ist die Zunahme des Wärmeverbrauchs je grad verschieden. Die gemessenen Werte für die Reihenhäuser, Bild 5, liegen alle unter dem errechneten Wert. Dafür können zwei Gründe verantwortlich sein.

- 1) Der Wärmebedarf Q_h kann zu hoch sein.

Dies ist möglich, da die Wärmebedarfsberechnung für die Heizungsanlegung davon ausgehen muß, daß zwei aneinandergrenzende Häuser nicht in jedem Fall gleich beheizt sind. Im normalen Heizbetrieb wird jedoch ein wesentlich geringerer Wärmeaustausch zwischen den Gebäuden auftreten.

- 2) Die Reihenhäuser werden u. U. weniger beheizt als die Bungalows.

Die Ergebnisse für das Wohnzimmer, Bild 6, zeigen, daß für den mittleren Wintertemperaturbereich zwischen 0 und 5°C eine gute Übereinstimmung vorliegt. Abweichungen ergeben sich für die übrigen Temperaturbereiche.

Den Bildern 2 bis 6 ist außerdem noch zu entnehmen, daß nicht erst unterhalb einer Außentemperatur von $+12^\circ\text{C}$ geheizt wird, wie es die VDI-Richtlinien 2067 vorsehen und wie es zur Berechnung der Gradtagzahlen für die Ermittlung des jährlichen Wärmeverbrauchs angenommen wird.

*Dieser Aufsatz wird in der nächsten Nummer der FfE-Berichte in BWK Nr. 5, Mai 1969, fortgesetzt.
Die Schriftleitung*

Aus der Arbeit der Forschungsstelle für Energiewirtschaft, Karlsruhe, Leiter Professor Dr.-Ing. H. Schaefer. In Fortführung der Zeitschrift »Praktische Energiekunde«, begründet von Professor Dr.-Ing. H. F. Mueller

Sonderteil zu Brennstoff-Wärme-Kraft 21 (1969) Nr. 5

In Gemeinschaft: VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, u. Springer-Verlag, Berlin, Berlin-Heidelberg-New-York

DK 536.68:697.13:621.317.385:697.27.003

Zusammenhänge zwischen Wärmebedarf und Klimadaten in einer allelektrischen Siedlung (Fortsetzung)

Von L. Rouvel, Karlsruhe*)

Heizleistungsbedarf und meteorologische Daten

Die tägliche Wärmehöchstlast, d. h. die höchste tägliche Viertelstundenleistung, hängt wie der Wärmebedarf hauptsächlich von der Außentemperatur ab. Zusätzlich ist auch der Wind zu berücksichtigen. Die Sonne hat nur dann einen Einfluß, wenn der Zeitpunkt der Höchstlast innerhalb der Sonnenscheindauer liegt. Deshalb ist in Bild 7 zuerst einmal die Häufigkeitsverteilung der Wärmehöchstlast über der Uhrzeit graphisch dargestellt. Es ist ersichtlich, daß die Höchstlast hauptsächlich am Abend nach 17.30 Uhr auftritt, und zwar mit folgender Verteilung: 68% bei den Bungalows, 79% bei den Reihenhäusern und 80% bei der Gesamtsiedlung. Das Maximum wird kurz vor 20 Uhr erreicht. Die restlichen 20 bis 32% verteilen sich gleichmäßig über den Tag, nur am Morgen zwischen 7 und 8 Uhr ist eine etwas größere Häufigkeit anzutreffen.

Die Nachtabsenkung der Heizung in jedem Haus wird zentral durch eine Schaltuhr eingeleitet. Wie aus den Leistungsganglinien zu ersehen ist, wird in der gesamten Siedlung etwa um 6 Uhr auf Normalheizung umgeschaltet. Normalerweise müßte die tägliche Höchstlast zu dieser Zeit auftreten, da dann die Räume hochgeheizt werden müssen. Dies ist jedoch nur für den getrennt gemessenen Wohnraum der Fall, in dem der Raumthermostat arretiert war. Das bedeutet andererseits für die Siedlung, daß wahrscheinlich ein Teil der Raumthermostate nachts heruntergestellt und erst wieder während des Tages bei Benutzung der Räume auf höhere Temperatur gestellt werden.

Ansatz für die Regressionsanalyse

Zur Bestimmung der Abhängigkeit der täglichen Wärmehöchstlast von den außerklimatischen Faktoren braucht die Sonnenintensität nicht berücksichtigt zu werden. Es wurde folgender Ansatz gewählt:

$$P_{\max} = P_{\max_0} + p_{\Delta\vartheta^*} \Delta\vartheta^* + p_{(v\Delta\vartheta)_1} (v\Delta\vartheta)_1 \quad (5).$$

Hierin bedeuten:

- P_{\max} 1) Siedlung: höchste tägliche Viertelstundenleistung des Heizwärmeverbrauchs in kW;
2) Wohnzimmer: höchste tägliche Stundenleistung des Heizwärmebedarfs beim Heizbeginn am Morgen in kWh/h,

- P_{\max_0} Konstantanteil in kW bzw. kWh/h,
 $\Delta\vartheta^*$ Differenz zwischen einer Innenraumtemperatur von 20 °C und dem Mittel ϑ^* aus mehreren Tagesmitteltemperaturen in grd,
 $(v\Delta\vartheta)_1$ Stundenmittel aus dem Produkt der Viertelstundenwerte von der Windgeschwindigkeit in m/s und der Differenz von der Raumtemperatur und Außentemperatur in grd; als Raumtemperatur ist für die Siedlung 22 °C und für das Wohnzimmer 20 °C angesetzt.

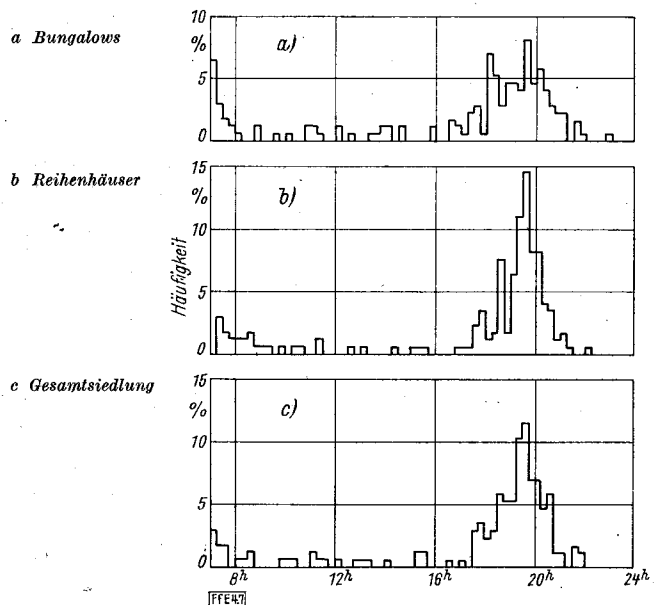


Bild 7. Häufigkeit der Wärmehöchstlast.

Das Stundenmittel ist ermittelt aus den Werten der drei Viertelstunden vor Auftreten der Spitze und der Viertelstunde, in der die Spitze auftrat. Für das Wohnzimmer wurde die Zeit des Auftretens der Stundenspitze gewählt.

- $p_{\Delta\vartheta^*}$ Regressionskoeffizient für $\Delta\vartheta^*$ in kW/grd,
 $p_{(v\Delta\vartheta)_1}$ Regressionskoeffizient für $(v\Delta\vartheta)_1$ in $\frac{\text{kW s}}{\text{m grd}}$.

Mit diesem Ansatz soll wie bei der Ermittlung des täglichen Wärmebedarfs zuerst festgestellt werden, welche der sechs verschiedenen Mittel ϑ^* von mehreren Tagesmitteltemperaturen den besten Zusammenhang ergibt.

*) Dipl.-Ing. Lothar Rouvel, Forschungsstelle für Energiewirtschaft an der Universität (TH) Karlsruhe.

Der erste Teil dieses Aufsatzes ist erschienen in den FFe-Berichten Nr. 1, März 1969, siehe BWK 21 (1969) Nr. 3, S. 171/77.

Zahlentafel 6. Bestimmtheitsmaß und halbseitige Streubandbreite der Regressionsgleichungen für die tägliche Viertelstundenwärmehöchstlast der Gesamtsiedlung.

Mitteltemperatur ϑ^*	Bestimmtheitsmaß B %	Halbseitige Streubandbreite ΔP_{\max} kW	Rangfolge
ϑ_n	88,8	45,8	5
$\frac{\vartheta_n + \vartheta_{n-1}}{2}$	91,4	39,3	2
$\frac{2\vartheta_n + \vartheta_{n-1}}{3}$	91,9	38,0	1
$\frac{\vartheta_n + 2\vartheta_{n-1}}{3}$	87,0	48,3	6
$\frac{\vartheta_n + \vartheta_{n-1} + \vartheta_{n-2}}{3}$	89,8	42,6	3
$\frac{\vartheta_n + 2\vartheta_{n-1} + \vartheta_{n-2}}{4}$	88,9	44,5	4

Die mittlere Viertelstundenhöchstlast beträgt 394,7 kW

Das Bestimmtheitsmaß B und die halbseitige Streubandbreite ΔP_{\max} der Regressionsgleichungen sind aus **Zahlentafel 6** ersichtlich. Mit diesen Werten wurde die tägliche Viertelstundenhöchstlast der Wärmeleistung für die Gesamtsiedlung in der Zeit vom 10. Januar bis 23. März 1968, in Abhängigkeit von den sechs verschiedenen Mitteltemperaturen ϑ^* errechnet. Die besten Ergebnisse werden mit der Zweitagesmitteltemperatur erreicht, bei der die Mitteltemperatur des betrachteten Tages doppelt gewichtet ist. Die reine Zweitagesmitteltemperatur führt zu fast gleichwertigen Aussagen.

Zur Analyse der täglichen Wärmehöchstlast für das Wohnzimmer wurde von der Viertelstundenleistung auf die stündliche Leistung übergegangen, da die Höhe der Viertelstundenleistung durch die Ein/Aus-Regelung der Heizung keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen augenblicklichem Heizwärmebedarf und Heizleistungsbedarf liefern.

Abhängig von der Taktzeit der Heizung und der zufälligen zeitlichen Verschiebung zwischen der Einschaltzeit der Heizung und der viertelstündlichen Meßperiode, unterliegt die mittlere viertelstündliche Leistung starken Schwankungen. So ist z. B. die Heizung teilweise bereits bei Außentemperaturen von $+5^\circ\text{C}$ über eine Viertelstunde ununterbrochen in Betrieb. Durch Verlängern des Meßintervalles auf eine Stunde sind diese Zufälligkeiten weitgehend ausgeschlossen.

Die tägliche Stundenhöchstlast tritt im Wohnzimmer überwiegend am Morgen nach dem Aufheben der Nachtabsenkung auf. Während des Tages wurde eine Leistungsspitze nur durch längeres Öffnen der Balkontür beim Reinigen des Zimmers verursacht. Da diese Spitzen nicht charakteristisch für den Wärmebedarf des Raumes sind und von der installierten Heizleistung abhängen, wurden bei der Regressionsanalyse nur die Morgenspitzen bei Heizbeginn berücksichtigt.

Diese Morgenspitze tritt im Zeitraum von 5 bis 7 Uhr auf. Die Tagesmitteltemperatur des betrachteten Tages hat daher keinen Einfluß mehr auf diese Höchstlast. Für die Regressionsanalyse der Wärmehöchstlast des Wohnzimmers sind deshalb die Mitteltemperaturen ϑ^* um einen Tag vorverlegt worden.

Das Bestimmtheitsmaß B und die halbseitige Streubandbreite ΔP_{\max} für die sechs Regressionsgleichungen sind in **Zahlentafel 7** enthalten. Die Rangfolge in der Aussagegenauigkeit der Regressionsgleichungen ist für das Wohnzimmer ähnlich wie für die Gesamtsiedlung. Das beste Ergebnis bringt der Ansatz des Temperaturmittels ϑ^* aus doppelt gewichtetem Vortag und einfach gewichtetem Vorvortag.

Ergebnisse

Für die endgültige Analyse des Einflusses von Außentemperatur und Windgeschwindigkeit auf die tägliche

Zahlentafel 7. Bestimmtheitsmaß und halbseitige Streubandbreite der Regressionsgleichungen für die tägliche Stundenhöchstlast der Wärmeleistung bei Heizbeginn für das Wohnzimmer.

Mitteltemperatur ϑ^*	Bestimmtheitsmaß B %	Halbseitige Streubandbreite ΔP_{\max} kWh/h	Rangfolge
ϑ_n	63,1	0,52	6
$\frac{\vartheta_{n-1} + \vartheta_{n-2}}{2}$	76,4	0,41	3
$\frac{2\vartheta_{n-1} + \vartheta_{n-2}}{3}$	80,4	0,38	1
$\frac{\vartheta_{n-1} + 2\vartheta_{n-2}}{3}$	67,0	0,49	5
$\frac{\vartheta_{n-1} + \vartheta_{n-2} + \vartheta_{n-3}}{3}$	76,9	0,41	2
$\frac{\vartheta_{n-1} + 2\vartheta_{n-2} + \vartheta_{n-3}}{4}$	74,9	0,43	4

Die mittlere tägliche Stundenhöchstlast beträgt 3,66 kWh/h

Wärmehöchstlast wurde deshalb für die Gesamtsiedlung, die Bungalows und die Reihenhäuser die gewichtete Zweitagesmitteltemperatur

$$\vartheta^* = \frac{2\vartheta_n + \vartheta_{n-1}}{3}$$

und für das Wohnzimmer

$$\vartheta^* = \frac{2\vartheta_{n-1} + \vartheta_{n-2}}{3}$$

gewählt, wobei für die Innentemperatur im Wohnzimmer die gemessene Raumtemperatur eingesetzt wurde. **Zahlentafel 8** enthält die Aufstellung der Ergebnisse der Zweifachregression, und zwar mit derselben zeitlichen Aufteilung, wie sie bei der Analyse des täglichen Wärmebedarfs vorgenommen wurde. Außerdem sind zum Vergleich auch die Einfachregressionen aufgeführt, bei denen nur der Parameter der Tagesmitteltemperatur ϑ' eingesetzt ist.

Die Ergebnisse in **Zahlentafel 8** zeigen, daß beim Vergleich der einzelnen Zeitabschnitte für die tägliche Wärmehöchstlast eine ähnliche Tendenz herauskommt wie für den täglichen Wärmeverbrauch. Es kann sich also nicht um zufällige Unterschiede handeln. Allerdings sind für die Bestimmung der Tageshöchstleistung die Unterschiede nicht sehr groß. Aus den Regressionsgleichungen läßt sich ersehen, daß eine Erhöhung der Windgeschwindigkeit um 1 m/s eine Steigerung des Leistungsbedarfs von etwa 3 bis 4% bewirkt. Der Einfluß des Windes ist also etwa doppelt so groß wie beim Wärmeverbrauch.

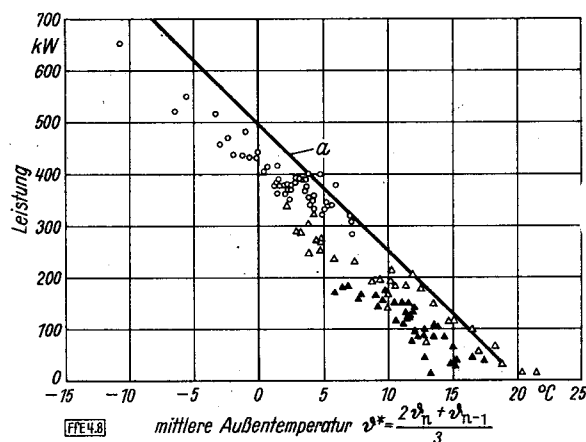


Bild 8. Tägliche Wärmehöchstlast der Gesamtsiedlung.

a Stündlicher Wärmebedarf nach DIN 4701

○ 10. Januar bis 23. März 1968

▲ 23. April bis 31. Mai 1968

△ 24. März bis 22. April 1968

analyse zur Bestimmung des Einflusses der außenklimatischen Faktoren auf die tägliche Wärmehöchstlast.

	Zeitspannen im Jahre 1968	Zweifachregression					Einfachregression						
		P_{\max_0} kW	$p\Delta\vartheta^*$ kW/grd	$p(\nabla\Delta\vartheta)_1$ kW/m ² /s	B %	ΔP_{\max} kW	$\Delta p\Delta\vartheta^*$ kW/grd	$\Delta p(\nabla\Delta\vartheta)_1$ kW/m ² /s	P_{\max_0} kW	$p\Delta\vartheta^*$ kW/grd	B %	ΔP_{\max} kW	$\Delta p\Delta\vartheta^*$ kW/grd
Gesamt- siedlung	10. Januar bis 23. März	78,4	15,91	0,465	91,9	38,0	1,67	0,192	102,8	16,19	80,4	58,6	2,30
	24. März bis 22. April	37,5	15,51	- 0,026	94,6	42,8	1,50	0,392	52,4	14,19	89,7	58,5	1,90
	23. April bis 31. Mai	- 8,4	13,55	77,2	77,2	48,5	2,99	0,535	- 0,9	12,81	63,7	60,2	3,12
	10. Januar bis 22. April	10,0	18,71	0,552	93,8	46,5	1,37	0,254	31,0	19,23	88,4	82,7	1,57
	24. März bis 31. Mai	- 10,3	16,21	82,2	82,2	67,8	2,02	0,458	6,1	15,08	70,8	86,3	2,34
	10. Januar bis 31. Mai	- 41,3	20,54	0,727	92,6	77,9	1,52	0,302	- 36,9	22,28	86,0	107,0	1,63
Bungalows	10. Januar bis 23. März	45,6	8,32	0,158	86,4	25,0	1,07	0,100	64,5	7,88	74,1	34,2	1,34
	24. März bis 22. April	23,7	8,12	0,023	87,7	35,4	1,25	0,336	32,6	7,42	82,4	41,7	1,35
	23. April bis 31. Mai	- 5,6	8,05	0,264	71,9	32,8	1,96	0,397	- 0,1	7,52	59,5	38,8	2,03
	10. Januar bis 22. April	12,5	9,60	0,226	92,0	12,5	0,76	0,124	24,3	9,65	86,0	49,5	0,88
	24. März bis 31. Mai	- 1,6	8,61	0,287	79,3	40,0	1,19	0,286	8,0	8,07	87,8	49,5	1,34
	10. Januar bis 31. Mai	- 13,4	10,54	0,318	91,9	41,3	0,76	0,138	- 10,6	11,24	85,0	56,1	0,86
Reihen- häuser	10. Januar bis 23. März	31,6	8,69	0,133	86,3	25,8	1,09	0,134	45,4	8,40	79,5	31,4	1,22
	24. März bis 22. April	21,2	7,30	- 0,028	92,9	23,4	0,83	0,234	28,0	6,66	88,0	29,9	0,97
	23. April bis 31. Mai	1,0	5,66	0,143	73,0	22,1	1,34	0,254	3,8	5,32	62,5	25,7	1,33
	10. Januar bis 22. April	3,0	9,51	0,151	91,6	35,6	0,80	0,155	13,7	9,65	86,8	44,4	0,85
	24. März bis 31. Mai	- 3,6	7,55	0,190	76,9	37,0	1,11	0,269	1,1	6,99	66,1	44,5	1,21
	10. Januar bis 31. Mai	- 24,8	10,44	0,363	90,5	44,9	0,86	0,180	- 22,6	11,23	84,2	57,8	0,88
Wohn- zimmer	10. Januar bis 23. März	1,32	0,123	0,0019	77,2	0,422	0,021	0,0028	2,14	0,087	62,1	0,528	0,021
	24. März bis 22. April	0,90	0,120	0,0026	81,9	0,428	0,027	0,0051	1,83	0,065	37,0	0,780	0,037
	23. April bis 31. Mai	- 0,04	0,177	0,0075	58,4	0,650	0,057	0,0092	0,84	0,119	37,0	0,787	0,057
	10. Januar bis 22. April	- 0,54	0,151	0,0054	86,4	0,512	0,016	0,0027	1,52	0,113	67,1	0,785	0,019
	24. März bis 31. Mai	0,27	0,152	0,0068	75,3	0,573	0,024	0,0043	1,16	0,102	42,4	0,872	0,032
	10. Januar bis 31. Mai	- 0,16	0,167	0,0068	89,8	0,569	0,013	0,0026	0,86	0,146	74,4	0,900	0,017



a Stündlicher Wärmebedarf nach DIN 4701

○ 10. Januar bis 23. März 1968 ▲ 23. April bis 31. Mai 1968
△ 24. März bis 22. April 1968



a Stündlicher Wärmebedarf nach DIN 4701

○ 10. Januar bis 23. März 1968 ▲ 23. April bis 31. Mai 1968
 Δ 24. März bis 22. April 1968

Um einen anschaulichen Überblick über die Abhängigkeiten zu erhalten, ist in **Bild 8** für die Siedlung, in **Bild 9** für die Bungalows, in **Bild 10** für die Reihenhäuser und in **Bild 11** für das Wohnzimmer die tägliche Wärmehöchstlast über der Außentemperatur ϑ^* aufgetragen. Außerdem ist noch der stündliche Wärmebedarf mit eingezeichnet, wie er sich nach DIN 4701 errechnet.

Für die Gesamtsiedlung sind die gemessenen Werte größtenteils kleiner als der errechnete Bedarf, nur einzelne Meßpunkte liegen höher. Daraus kann jedoch noch nicht der Schluß gezogen werden, daß der errechnete Wärmebedarf nach DIN 4701 als Auslegungsgrundlage für die Heizung richtig ist, da der effektive Bedarf einzelner Häuser erheblich größer sein kann. So überschreiten z. B. bei den Bungalows, Bild 9, knapp ein Drittel der Meßwerte den errechneten Bedarf nach DIN 4701. Die Wärmehöchstlast der Reihenhäuser, Bild 10, erreicht bei einzelnen Extremfällen gerade den rechnerischen Bedarf.

Die Unterschiede zwischen den Bungalows und den Reihenhäusern können zwei Ursachen haben:

- 1) Der errechnete Wärmebedarf nach DIN 4701 für die Reihenhäuser ist im Vergleich zu den Bungalows zu hoch ausgewiesen, da ein relativ großer Wärmeaustausch zwi-

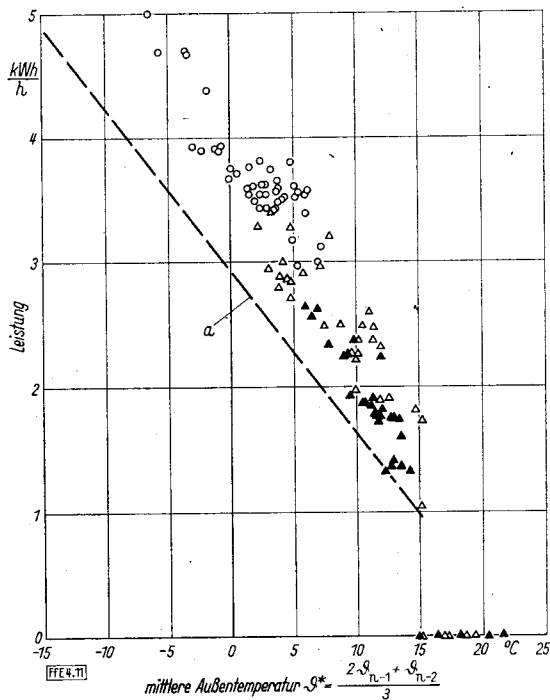


Bild 11. Tägliche Wärmehöchstlast des Wohnzimmers.

a Stündlicher Wärmebedarf nach DIN 4701

○ 10. Januar bis 23. März 1968 ▲ 23. April bis 31. Mai 1968
△ 24. März bis 22. April 1968

schen aneinandergrenzenden Häusern vorausgesetzt wurde. Auf diesen Umstand wurde bereits bei der Ermittlung des täglichen Heizstromverbrauchs hingewiesen.

- 2) In den Reihenhäusern werden im Durchschnitt weniger Räume voll beheizt als bei den Bungalows.

Da die tägliche Wärmehöchstlast der gemeinsam gemessenen Bungalows teilweise höher ist als der errechnete Wert nach DIN 4701, ist zu erwarten, daß für ein einzelnes Haus oder für ein einzelnes Zimmer eine wesentlich größere Überschreitung vorkommen wird. Dies wird auch durch Bild 11 bestätigt, in dem die tägliche Wärmehöchstlast für das Wohnzimmer über der Außentemperatur aufgetragen ist. Die stündlichen Leistungsspitzen, die immer am Morgen kurz nach Aufheben der Nachtabsenkung auftreten, sind im Mittel etwa 30% — im Extremfall sogar rd 60% — höher als der errechnete Wert.

Obwohl dies nach den vorherigen Darstellungen zu erwarten war, überrascht es trotzdem, daß entgegen der allgemeinen Ansicht — nach der die Q_h -Werte nach DIN 4701 im allgemeinen wesentlich zu hoch sind — für diese Siedlung das Gegenteil nachgewiesen werden kann. Wie noch bei der Behandlung des Heizleistungsgangs während des Tages näher erläutert wird, kann bereits jetzt als entscheidende Ursache hierfür angegeben werden, daß die Rechenvorschrift nach DIN 4701 die Wärmespeicherfähigkeit der Raumumschließungsflächen sowie des Mobiliars vollständig unberücksichtigt läßt. Je größer die Speicherfähigkeit der Wände ist, um so höher wird der Leistungsbedarf nach der Nachtabsenkung. Andererseits ist jedoch die wirksame Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Außentemperatur für den Auslegungszustand nicht so groß wie in DIN 4701 vorgeschrieben, da die Integrationszeit für die Außentemperatur mit wachsender Speicherfähigkeit zunimmt und somit kurzzeitige extreme Außentemperaturen kaum ins Gewicht fallen.

Leistungsgang des Wärmebedarfs

Außer der Betrachtung des täglichen Wärmebedarfs, der Höchstlast am Tage und dem Zeitpunkt ihres Auftretens interessiert besonders der zeitliche Verlauf der Heizleistung über den Tag. Daraus kann geschlossen werden,

welche Leistungserhöhungen bei den Übertragungsleitungen leitungsgebundener Energieträger zu erwarten sind, wenn Siedlungen mit Direktheizungen ausgestattet werden. Zudem kann man u. U. weitere Aussagen über den Einfluß der Bauweise auf den Leistungsbedarf erhalten. Nicht zuletzt soll versucht werden, die Ursachen für die Unterschiede des Heizleistungs- sowie des Wärmebedarfs während der verschiedenen Zeitabschnitte im Winter stärker einzugrenzen.

Um zufällige Schwankungen des Leistungsbedarfs möglichst auszuschalten, wird im folgenden nicht der Leistungsgang eines einzelnen Tages, sondern das Mittel von mehreren Tagen betrachtet. Außer dem mittleren Leistungsbedarf für jede Viertelstunde am Tage werden noch jeweils die Extremwerte, d. h. Maximal- und Minimalleistung, während des betrachteten Zeitraumes angegeben. Hierdurch ist es möglich, die Schwankungsbreite in Abhängigkeit von der Tageszeit zu erkennen und die Ursachen anzugeben.

Die Zeitabschnitte wurden so gewählt, daß die Zweitagesmitteltemperatur möglichst nicht mehr als $\pm 1,5$ grad um die mittlere Temperatur schwankt. Insgesamt wurden die Leistungsganglinien für die sechs in **Zahlentafel 9** angegebenen Zeitabschnitte ermittelt. Der erste Abschnitt (vom 10. bis 12. Januar 1968) enthält die kältesten Tage der Heizperiode 1967/68.

Siedlung

Die Leistungsganglinien für die Gesamtsiedlung sind in **Bild 12** dargestellt. Es ist deutlich ersichtlich, daß der Heizleistungsbedarf während des Tages keinen allzu-großen Schwankungen unterliegt. Während der Nacht ist wegen der Raumtemperaturabsenkung ein wesentlich geringerer Bedarf vorhanden, der für die Zeit von 24 bis etwa 6 Uhr konstant ist. Um 6 Uhr steigt die Heizleistung stark an, überschreitet jedoch im allgemeinen nicht den Leistungsbedarf des Zeitraumes zwischen 18 und 20 Uhr. Zwischen 10 und 16 Uhr ist eine Verminderung des Heizwärmebedarfs zu erkennen, danach erhöht er sich wieder und erreicht zwischen 18 und 20 Uhr sein Maximum. Nach 22 Uhr erkennt man deutlich den Beginn der Nachtabsenkung.

Der Bereich zwischen den Maximal- und den Minimalwerten ist mit Ausnahme der Zeit zwischen etwa 10 und 18 Uhr sehr klein. Die größere Streuung während der restlichen Zeit erklärt sich aus dem Einfluß der unterschiedlichen Sonneneinstrahlung. Aus der geringen Streubreite kann geschlossen werden, daß es keinen systematischen Unterschied zwischen dem Wärmebedarf an Werktagen, Samstagen und Sonntagen gibt, da alle Tage in die Betrachtung mit einbezogen sind.

Beim Vergleich der einzelnen Ganglinien fällt auf, daß der Leistungsbedarf für den Zeitraum vom 4. bis zum 10. April 1968, **Bild 12**, zwischen 6 und 18 Uhr für die in dieser Zeit herrschenden mittleren Außentemperatur sehr niedrig ist. Dies läßt sich teilweise durch die sehr hohe Sonnenintensität in dieser Woche erklären. Trotzdem ist noch nicht geklärt, warum die Leistung zwischen 7 und 8 Uhr wesentlich stärker vom Abendeleistungsbedarf abweicht, als dies im Winter zu beobachten ist. Wahrscheinlich werden in der Übergangszeit während des Tages im Mittel weniger Räume beheizt bzw. mehr Räume auf niedrigerer Tem-

Zahlentafel 9. Mittelwerte der klimatischen Faktoren für sechs Zeitabschnitte.

Nr.	Zeitspannen im Jahre 1968	Mittlere Zweitages-temperatur °C	Mittlere Wind-geschwindigkeit m/s	Mittlere Sonnen-intensität grad
1	10. bis 12. Januar	- 5,0	3,4	2,2
2	23. bis 29. Februar	- 1,5	2,7	2,5
	(24. Febr. bis 1. März)	- 1,5	2,5	3,0
3	14. bis 20. Februar	+ 2,2	2,0	1,5
4	6 bis 12. März	+ 2,7	3,1	1,7
5	4. bis 10. April	+ 4,0	1,9	4,9
6	8. bis 14. Mai	+ 10,6	3,1	3,3

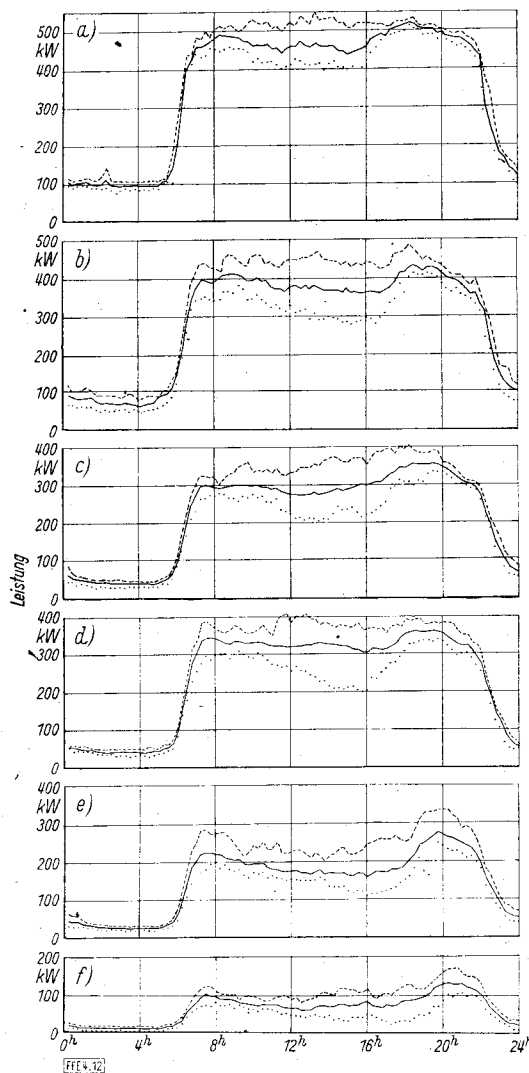


Bild 12. Ganglinien der Heizleistung der Gesamtsiedlung.

peratur gehalten als im Winter. Auf die Heizgewohnheiten der Hausbewohner dürfte es außerdem zurückzuführen sein, daß der Wärmebedarf für die Zeit vom 6. bis zum 12. März, Bild 12d, etwas höher liegt als für die Zeit vom 14. bis zum 20. Februar 1968, Bild 12c, obwohl das Außenklima keine wesentlichen Unterschiede aufweist. Im dazwischenliegenden Zeitraum (23. bis 29. Februar 1968), Bild 12b, war es wesentlich kälter. Die Bewohner haben wahrscheinlich die Vollraumheizung noch weiterhin beibehalten, obwohl es wärmer wurde.

Es ist daher mit ziemlicher Sicherheit anzunehmen, daß die bei der Regressionsanalyse ermittelten Unterschiede des Wärmeverbrauchs und des Heizleistungsbedarfs in den verschiedenen Zeitabschnitten zumindest teilweise durch individuelle Heizungsregelung verursacht worden sind.

Für dieselben Zeitabschnitte wie für die Gesamtsiedlung sind auch die Ganglinien der Heizleistung in Bild 13 für die Bungalows und in Bild 14 für die Reihenhäuser aufgezeichnet. Charakteristische Unterschiede gegenüber der Gesamtsiedlung lassen sich nicht erkennen. Beim Vergleich der Leistungsgänge der beiden Haustypen für gleiche Zeiten ergeben sich jedoch weitere Aufschlüsse. Der Leistungsanstieg um 6 Uhr ist bei den Bungalows wesentlich steiler. Das Maximum wird bereits etwa um 7 Uhr erreicht, bei den Reihenhäusern dagegen erst zwischen 8 und 9 Uhr. Außerdem ist der Rückgang des Wärmebedarfs zwischen 8 und 18 Uhr bei den Reihenhäusern wesentlich stärker ausgeprägt. Wie bereits bei der Beschreibung der Häuser erwähnt, ist der Anteil der Fensterfläche, bezogen auf die Außenfläche, bei den Reihenhäusern größer, so daß sich

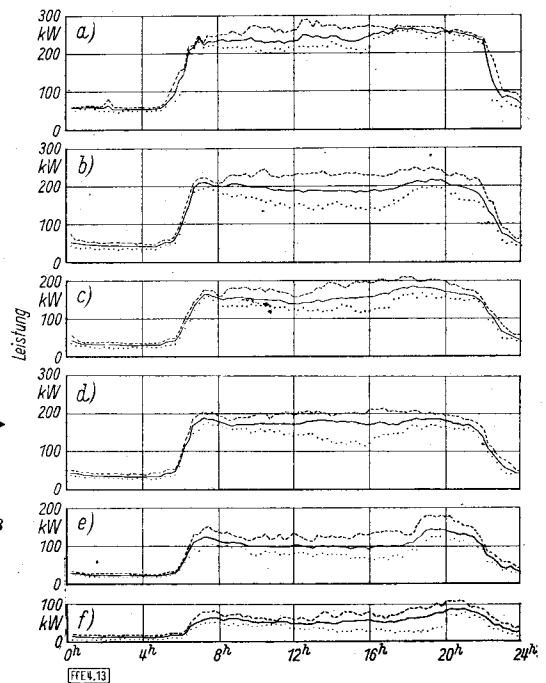


Bild 13. Ganglinien der Heizleistung der Bungalows.

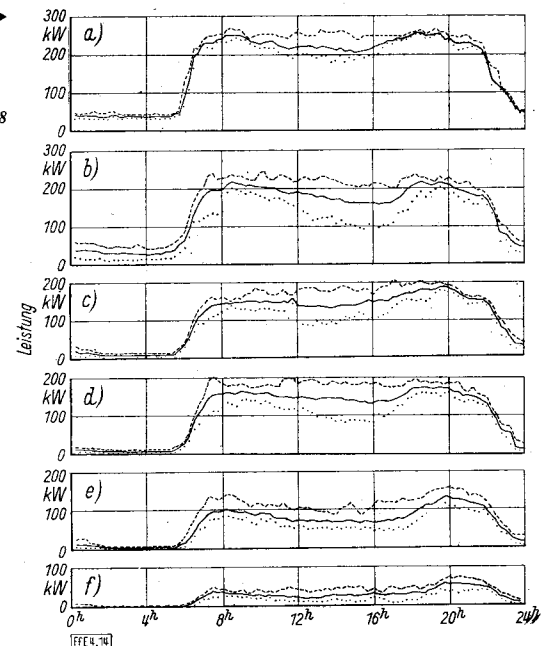


Bild 14. Ganglinien der Heizleistung der Reihenhäuser.

die Sonneneinstrahlung stärker auswirken kann. Zudem sind die Außenwände aller Reihenhäuser nach NO und SW orientiert, während die Bungalows allein schon durch die unterschiedlichen Grundrisse sehr verschieden ausgerichtet sind.

Der Wärmebedarf während der Nacht ist für die Bungalows wesentlich höher als für die Reihenhäuser. Im Winter ist der Leistungsbedarf am Tage für beide Hausgruppen etwa gleich, in der Übergangszeit dagegen ist er für die Reihenhäuser wesentlich niedriger. Auch hierbei zeigen sich die unterschiedlichen Heizgewohnheiten.

Wohnraum

Ein völlig anderer Leistungsgang ergibt sich für das Wohnzimmer, Bild 15. Während der Nachtabsenkung schaltete der Raumthermostat selbst bei der tiefsten Außentemperatur der Heizperiode 1967/68 nicht ein. Die Heizleistung ist am größten bei Heizbeginn am Morgen und geht kontinuierlich bis zum Abend zurück.

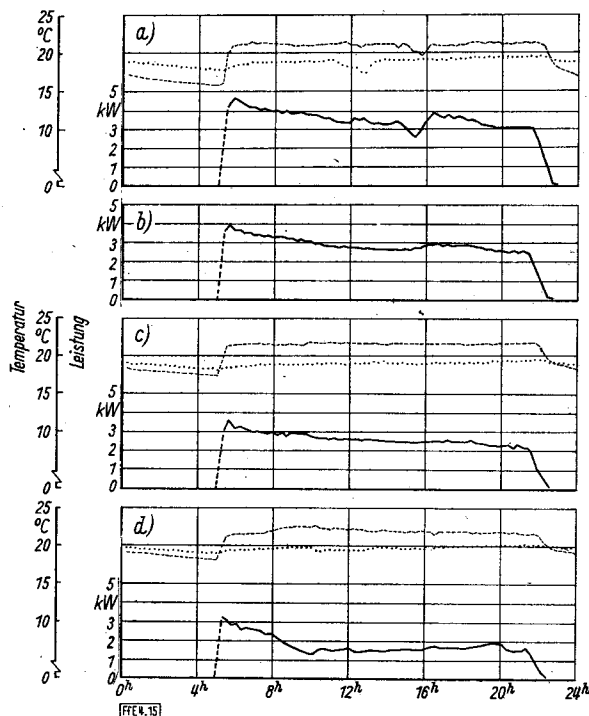


Bild 15. Ganglinien der Heizleistung und der Raumtemperaturen des Wohnzimmers.

----- Wohnzimmertemperatur a 10. bis 12. Januar 1968
 ————— Mittlere Heizleistung b 24. Februar bis 1. März 1968
 Küchenwandtemperatur c 6. bis 12. März 1968
 d 4. bis 9. April 1968

In Bild 15 sind die Minimal- und Maximalwerte nicht eingezeichnet, da sie aufgrund der Zweipunktregelung der Heizung keine Aussagekraft haben. Um außerdem noch den Mittelwert von zufälligen Schwankungen frei zu machen, wurde das gleitende 4-Werte-Mittel gebildet. Hierdurch wird jedoch auch der sprunghafte Leistungsanstieg bei Heizbeginn ausgeglichen. Um einen falschen Eindruck zu vermeiden, ist deshalb der effektive Leistungsgang zu diesem Zeitpunkt gestrichelt angegeben. Da die Nachtabsenkung am Abend von den Hausbewohnern teilweise verzögert wurde, geht die Heizleistung aufgrund der Mittelwertbildung relativ langsam, innerhalb etwa einer Stunde, zurück.

In Bild 15 ist außerdem noch der mittlere Verlauf der Raumtemperatur im Wohnzimmer sowie die Küchenwandtemperatur als Ersatzgröße für die Temperatur der Innenwände angegeben. Die Wohnzimmertemperatur ist während der Heizzeit konstant. Kurzzeitige Absenkungen, wie sie im Zeitraum vom 10. bis zum 12. Januar 1968, Bild 15a, kurz vor 16 Uhr auftraten, sind durch Lüften beim Reinigen des Raumes bedingt. Während dieser Zeit wurde die Heizung ausgeschaltet. Verständlicherweise erhöht sich danach der Leistungsbedarf.

Bei Beginn der Nachtabsenkung fällt die Raumtemperatur kurzzeitig stark ab, bis sie etwas niedriger ist als die Wandtemperatur. Danach wird der Wärmebedarf des Raumes durch Entspeichern der Wände gedeckt; die Wandtemperatur sinkt langsam, ebenso die Raumtemperatur. Obwohl die Heizungsunterbrechung rd. 8 h anhält, sinkt die Raumtemperatur auch bei extrem tiefen Außentemperaturen nicht unter die am Thermostaten eingestellte Temperatur von 16 °C. Die während der Nacht den Wänden entzogene Wärme muß ihnen am Tag wieder zugeführt werden. Daher wird bei Heizbeginn eine wesentliche höhere Heizleistung benötigt, als es dem quasistationären Wärmebedarf entspricht. Je weiter die Aufspeicherung der Wände fortgeschritten ist, in Bild 16 an der Temperaturerhöhung der Küchenwand erkennbar, desto geringer wird der Heizleistungsbedarf.

Mit Ausnahme des Zeitabschnittes vom 4. bis zum 9. April, Bild 15d, ist der Einfluß der Sonneneinstrahlung

nicht eindeutig am Heizleistungsgang zu erkennen. Für diesen Zeitraum sinkt der Leistungsbedarf nach 9 Uhr stark ab, bleibt bis etwa 16 Uhr konstant und steigt danach geringfügig. Die Raumtemperatur ist zwischen 8 und 13 Uhr höher als am Thermostaten eingestellt. Die Ursache ist eindeutig die überdurchschnittliche Sonneneinstrahlung durch das nach Süd-West orientierte Veranda fenster.

Bei der Behandlung des maximalen Leistungsbedarfs für die Heizung wurde schon darauf hingewiesen, daß die Wärmebedarfsrechnung nach DIN 4701 zu völlig falschen Werten kommt, da sie die Speicherefähigkeit der Raumschließungsflächen nicht berücksichtigt. Durch die Bauweise der Häuser wurde erreicht, daß die Auskühlung der Räume nur sehr langsam erfolgt und somit eine Beheizung während der Nacht nicht notwendig ist. Dafür muß jedoch während des Tages eine wesentlich höhere Heizleistung zur Verfügung stehen, als sie sich nach DIN 4701 errechnet. Andererseits wird durch die gewählte Bauweise eine lange thermische Zeitkonstante erreicht, so daß kurzzeitige Schwankungen der Außentemperatur sich kaum auf die Beheizung auswirken. Besonders niedrige Außentemperaturen dauern jedoch kaum länger als einen Tag an.

So wurde für die Siedlung am kältesten Tag der Heizperiode 1967/68 eine Tagesmitteltemperatur von -11,8 °C gemessen, der Vor- und Nachttag war jedoch wesentlich wärmer. Daher kann für diese Siedlung die Auslegungstemperatur wesentlich höher als die vorgeschriebenen -12 °C gewählt werden. Durch das Zusammentreffen einer großen Wärmespeicherefähigkeit und einer langen Zeitkonstanten des Gebäudes ergibt sich für die Auslegung der Heizung eine größenordnungsmäßige Übereinstimmung des effektiven maximalen Wärmebedarfs mit dem Wärmebedarf Q_h nach DIN 4701. Diese Ergebnisse können jedoch nicht ohne weiteres auf andere Gebäude übertragen werden, da beide Voraussetzungen nicht immer gleichzeitig erfüllt sind.

Haushaltsstromverbrauch

Um zu vermeiden, daß sich dem Leistungsbedarf für die Heizung noch ein allzu hoher Anteil des allgemeinen Haushaltsstrombedarfs überlagert, ist die Warmwasserbereitung der 50 WoE in die Zeit der Heizungsnachtabsenkung verlegt worden. Über eine Schaltuhr in jedem Haus wird die Beheizung der Warmwasserboiler zwischen 23 und 6 Uhr Niedrigtarifzeit (NT) freigegeben. Bei sehr hohem Wasserverbrauch kann auch am Tage nachgeladen werden. Der mittlere Leistungsgang des Haushaltsstromverbrauchs für die Zeit vom 14. bis zum 20. Februar und vom 8. bis zum 14. Mai 1968 ist in Bild 16 dargestellt.

Warmwasserbereitung

Deutlich ist in Bild 16 um 23 Uhr der Leistungsanstieg, bedingt durch die Warmwasserbereitung, zu erkennen. Das Maximum wird bereits vor 24 Uhr überschritten. Ab etwa 2 Uhr dürfte die Warmwasserbereitung fast vollständig beendet sein. Geht man davon aus, daß zwischen 23 und 2 Uhr ein Grundanteil für Beleuchtung, Kleingeräte usw. benötigt wird, so kann der Stromverbrauch für die Warmwasserbereitung ermittelt werden. Als Grundanteil wird hierbei der Verbrauch unter der gedachten Verbindungslinie des Bedarfs für 22.45 Uhr und für 3 Uhr gewertet.

Für die tägliche Warmwassererwärmung errechnet sich hiermit ein mittlerer Stromverbrauch von 380,7 kWh/d für den ersten und von 330,4 kWh/d für den zweiten Zeitabschnitt. Wie eine Stichprobenüberprüfung gezeigt hat, ist dieser Unterschied systematisch und hängt von der Außentemperatur ab. Der Stromverbrauch $A_{ww,a}$ für die Warmwasserbereitung läßt sich somit aus der Gleichung

$$A_{ww,a} = 274 + 6,0 (20^\circ\text{C} - \vartheta) \text{ in kWh/d} \quad (6)$$

bestimmen, wobei ϑ die mittlere Außentemperatur in °C ist.

Die Leistungsspitze zwischen 23 und 24 Uhr ist jedoch unabhängig von der Außentemperatur. Aus 166 Meßwerten ergibt sich als Mittel 256,7 kW mit einem Stichprobenfehler von nur $\pm 1,9$ kW bei einer statistischen Sicherheit von

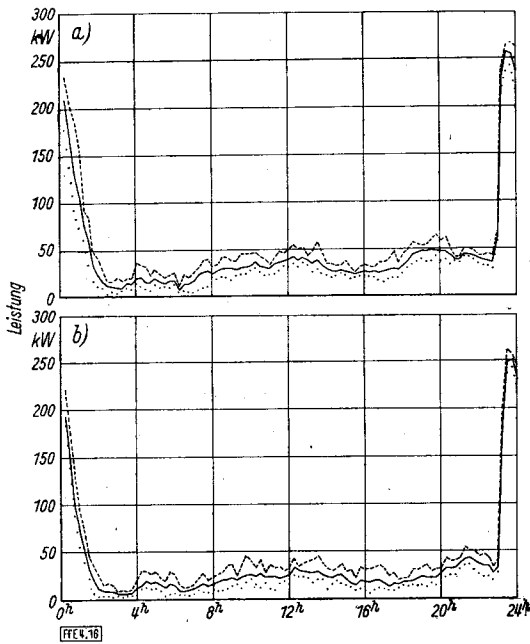


Bild 16. Ganglinien des Haushaltleistungsbedarfs der Gesamtsiedlung.

----- Maximale Leistung
 ————— Mittlere Leistung
 Minimale Leistung
 a 14. bis 20. Februar 1968
 b 8. bis 14. Mai 1968

95%. Der Erwartungsbereich der Einzelwerte errechnet sich zu 232 bis 281 kW. Nach Abzug des Grundanteils von etwa 30 kW beträgt somit der mittlere Gleichzeitigkeitsfaktor g für die Warmwasserbereitung rd. 75%. Durch schaltungstechnische Maßnahmen müßte es möglich sein, den überraschend hohen Wert von g etwas abzubauen und die Warmwasserbereitung stärker auf die Zeit zwischen 23 und 6 Uhr zu verteilen. Hierdurch würde auch das Leistungstal zwischen 2 und 6 Uhr, das sich bei Betrachtung des Gesamtleistungsbedarfs der Siedlung ergibt, ausgeglichen werden.

Allgemeiner Haushaltverbrauch

Der Leistungsbedarf am Tage unterscheidet sich ebenfalls in den beiden Zeitabschnitten, Bild 16. Auffällig ist das wesentlich spätere und schwächere Ansteigen am Abend für die Woche im Mai gegenüber dem Februar. Außerdem ist auch der Bedarf zwischen 8 und 16 Uhr geringer. Als Einflußfaktoren kommen zuerst die täglichen Dunkelstunden D in Betracht. Da keine Messungen über die Helligkeit durchgeführt wurden, mußten die Dunkelstunden aus den Angaben über Sonnenuntergang und -aufgang errechnet werden. Die Regressionsgleichung für den täglichen Stromverbrauch A_{Hd} der 50 Haushalte, die aus 169 Tageswerten ermittelt wurde, lautet:

$$A_{Hd} = 584 + 30,9 D \text{ in kWh/d} \quad (7).$$

Hierbei ist das Bestimmtheitsmaß $B = 48,3\%$ und die halbseitige Streubandbreite $\Delta A_{Hd} = \pm 160 \text{ kWh/d}$. Der relativ niedrige Wert für das Bestimmtheitsmaß B ist verständlich, da die Dunkelstunden die Bewölkung am Tag nicht berücksichtigen und somit keine eindeutige Aussage über den Beleuchtungsbedarf geben.

Wie bereits bei der Ermittlung des Stromverbrauchs für die Warmwasserbereitung gezeigt wurde, hat hierbei auch die Außentemperatur einen Einfluß. Als Parameter wird die Temperaturdifferenz $\Delta\theta''$ gewählt, d. h. die Differenz zwischen 20°C Innentemperatur und der Außentemperatur im Zweitagesmittel. Das Ergebnis

$$A_{Hd} = 749 + 15,5 \Delta\theta'' \text{ in kWh/d} \quad (8)$$

hat ein besseres Bestimmtheitsmaß B von $58,8\%$ und eine kleinere halbseitige Streubandbreite ΔA_{Hd} von $\pm 143 \text{ kWh/d}$.

Während der Ansatz mit den Dunkelstunden insbesondere die Beleuchtungszeit berücksichtigt, wird beim Einführen der Außentemperatur als Parameter davon ausgegangen, daß z. B. für die Warmwasserbereitung im Winter mehr Energie benötigt wird. Bei diesen Überlegungen muß jedoch bedacht werden, daß die Dunkelstunden und die Außentemperatur voneinander nicht unabhängig sind. Da jedoch eine Phasenverschiebung zwischen höchsten Dunkelstunden und tiefster Außentemperatur von etwa 1 bis 2 Monaten vorliegt, wurde trotzdem eine Zweifachregression durchgeführt, die folgendes Ergebnis hat:

$$A_{Hd} = 637 + 14,2 D + 11,1 \Delta\theta'' \text{ in kWh/d} \quad (9).$$

Das Bestimmtheitsmaß B hat sich auf $64,1\%$ verbessert, die halbseitige Streubandbreite auf $\pm 134 \text{ kWh/d}$ verringert. Die Varianz des Regressionskoeffizienten für die Dunkelstunden beträgt $\pm 34\%$, für die Temperatur $\pm 23\%$.

Die mittlere Dunkelstundenzahl im Erfahrungsbereich ist $12,1 \text{ h/d}$, die mittlere Temperaturdifferenz $13,5 \text{ grd}$, was einer Außentemperatur von $+6,5^\circ\text{C}$ entspricht. Der mittlere tägliche Haushaltsstromverbrauch beträgt 958 kWh/d oder $19,2 \text{ kWh/d WoE}$.

Als Vergleich sind diesen Ergebnissen die Werte aus den Zählerablesungen des EVU gegenübergestellt. Der Verbrauch konnte hierbei getrennt für die Hochtarifzeit (HT) (6 bis 23 Uhr) und die Niedrigtarifzeit (NT) (23 bis 6 Uhr) ermittelt werden. Der Ableszeitraum entspricht den Angaben für den Stromverbrauch der Heizung, nämlich 6. 10. 1967 bis 8. 4. 1968. Die Ergebnisse sind in **Zahlentafel 10** getrennt für die Bungalows, die Reihenhäuser und die Gesamtsiedlung zusammengestellt. Als erstes fällt auf, daß der Verbrauch während der NT-Zeit größer ist als für die HT-Zeit, wobei die Unterschiede bei den Bungalows am stärksten sind.

Zahlentafel 10. Haushaltstromverbrauch der Siedlung für die Zeit vom 6. 10. 1967 bis zum 8. 4. 1968.

		Gesamtverbrauch		Verbrauch je Wohnungseinheit		
		kWh	kWh/d	Mittelwert kWh WoEd	Vertrauensbereich des Mittelwertes kWh WoEd	Erwartungsbereich der Einzelwerte kWh WoEd
Bungalows	HT*)	30 950	168	7,7	6,2 bis 9,2	0,7 bis 14,7
	NT**)	47 080	256	11,6	9,9 bis 13,3	3,6 bis 19,5
Reihenhäuser	HT	43 440	236	8,4	6,5 bis 10,3	0 bis 18,4
	NT	51 075	278	9,9	8,7 bis 11,1	3,7 bis 16,1
Gesamtsiedlung	HT	74 390	404	8,1	6,9 bis 9,3	9 bis 16,7
	NT	98 155	534	10,7	9,7 bis 11,7	3,7 bis 17,7

*) Hochtarifzeit ***) Niedrigtarifzeit

Aus der Gegenüberstellung des Stromverbrauchs während der NT-Zeit und den Werten für die Warmwasserbereitung folgt, daß etwa zwei Drittel der elektrischen Energie zwischen 23 und 6 Uhr für die Warmwassererzeugung und das restliche Drittel für den sonstigen Haushalt benötigt werden.

Zusammenfassung

Zur Ermittlung des Zusammenhanges zwischen dem Wärmebedarf und den außenklimatischen Daten wurde eine einheitlich gebaute und ausgerüstete Siedlung mit elektrischer Direktheizung ausgewählt. Hierbei war es auch meßtechnisch möglich, eine Unterscheidung zwischen zwei Haustypen, nämlich Bungalows und Reihenhäusern, zu treffen. Mit Hilfe der mathematischen Statistik konnten die Abhängigkeiten des Heizleistungs- und Heizenergiebedarfs von der Außentemperatur, der Windgeschwindigkeit und der Sonnenintensität mit einem überraschend hohen Bestimmtheitsmaß quantifiziert werden. Es stellte sich heraus, daß nicht die Außentemperatur des jeweils

betrachteten Tages, sondern ein Mittel der Außentemperatur mehrerer Tage die Temperaturabhängigkeit des täglichen Wärmebedarfs mit hoher statistischer Sicherheit beschreibt. Der Grund hierfür liegt bei der großen thermischen Zeitkonstante der Außenwände in dieser Siedlung.

Zum anderen konnten für verschiedene Zeitabschnitte während der Heizperiode systematische Unterschiede für den Heizwärmebedarf festgestellt werden. Diese Veränderungen lassen sich jedoch nicht allein durch die Heizgewohnheiten der Hausbewohner erklären, da dieselben Erscheinungen auch in einem getrennt gemessenen Wohnraum ermittelt werden konnten, dessen Raumthermostat arretiert war. Allem Anschein nach kommen als Ursache hauptsächlich unterschiedliche Zusammenhänge der außerklimatischen Faktoren in den einzelnen Zeitabschnitten in Betracht. Ein weitergehender Aufschluß wird nach der Auswertung der Meßergebnisse für die laufende Heizperiode 1968/69 erwartet.

Aus der Regressionsanalyse läßt sich folgern, daß sich der tägliche Wärmebedarf bei Erhöhung der Windgeschwindigkeit um 1 m/s etwa um 1,5 bis 2% erhöht, während die Sonneneinstrahlung einen Heizwärmerückgang bedingt, der im Extremfall einer Außentemperaturerhöhung von rd. 4 bis 4,5 grad entspricht. Für den maximalen Heizleistungsbedarf ist die Sonneneinstrahlung nicht von Bedeutung, da die Höchstlast in der Siedlung hauptsächlich am Abend nach 17.30 Uhr auftritt. Der Einfluß der Windgeschwindigkeit auf die tägliche Höchstlast ist etwa doppelt so hoch wie beim Wärmeverbrauch.

Bemerkenswerte Ergebnisse lassen sich durch den Vergleich der Meßwerte mit den Rechenvorschriften zur Er-

mittlung des stündlichen Wärmebedarfs Q_h nach DIN 47 sowie zur Ermittlung des Wärmeverbrauchs nach VDI 20 gewinnen. Entgegen der allgemeinen Ansicht, nach der die Q_h -Werte nach DIN 4701 im allgemeinen wesentlich zu hoch sind, kann für die Siedlung das Gegenteil nachgewiesen werden. Als entscheidende Ursache hierfür kann angegeben werden, daß die Wärmebedarfsrechnung nach DIN 4701 die Speicherefähigkeit der Raumumschließungsflächen nicht berücksichtigt. Durch die Bauweise der Häuser wurde erreicht, daß die Abkühlung der Räume sehr langsam erfolgt und daher sich die Heizung während der Nacht nicht einschaltet. Dafür muß jedoch während des Tages eine wesentlich höhere Heizleistung zur Verfügung stehen, als sie sich nach DIN 4701 errechnet. Andererseits wird durch die gewählte Bauweise eine lange thermische Zeitkonstante erreicht, so daß kurzzeitige Außentemperschwankungen für die Heizung nicht wirksam werden. Besonders die extremen Außentemperaturen, die zur Heizungsauslegung herangezogen werden, dauern i. a. kaum länger als einen Tag. Durch das Zusammentreffen von großer Wärmespeicherfähigkeit und langer Zeitkonstante der Gebäude ergibt sich eine größenordnungsmäßige Übereinstimmung des maximalen Wärmebedarfs mit dem Wärmebedarf Q_h nach DIN 4701.

Weiterhin konnte auch hier festgestellt werden, daß nicht erst bei Außentemperaturen unter + 12 °C geheizt wird, wie es die VDI-Richtlinien 2067 vorsehen und wie es zur Berechnung der Gradtagzahlen für die Ermittlung des jährlichen Wärmeverbrauchs angenommen wird. Die Grenze liegt in der untersuchten Siedlung etwa bei einer Zweitagesmitteltemperatur von + 15 °C bis + 16 °C. FFE 4

veröffentlicht in der BWK:

Rouvel L., Zusammenhänge zwischen Wärmebedarf und Klimadaten in einer
allelektrischen Siedlung
FfE-Berichte Nr.1 in BWK 21 (1969), Nr.3, S.171/177
FfE-Berichte Nr.2 in BWK 21 (1969), Nr.5, S.283/290

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

