

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 42 (1951)
Heft: 11

Artikel: Untersuchung von Raumheizungs-Fragen durch elektrische Modell-Abbildung
Autor: Czepek, R.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1060997>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 16.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

sprechend höher wird. Selbstverständlich können, wo es notwendig erscheint, auch A-Systeme mit Spannbändern versehen werden und erreichen dann beträchtlich höhere Empfindlichkeiten als K-Systeme. Für gewisse Anwendungsgebiete, z. B. dort, wo die Platzfrage Hauptsache ist und die Nachteile nicht ins Gewicht fallen, erscheint die Anwendung von K-Systemen zweckmässig.

Literatur

- [1] *Keinath, Georg*: Die Technik der elektrischen Messgeräte. 448 S. München und Berlin: Oldenbourg 1921.
- [2] *Hug, A.*: Permanente Magnete, die Dimensionierung ihres Kreises. Bull. SEV Bd. 41 (1950), Nr. 18, S. 661...669.
- [3] *Merz, Ludwig*: Die Dämpfung elektrischer Messgeräte nach den neuen VDE 0410/X 38, Regeln für Messgeräte. Elektrotechn. Z. Bd. 60 (1939), Nr. 47, S. 1332...1335.

Adresse des Autors:

Alfred Hug, Dipl. Ing., Trüb, Täuber & Co. A.-G., Zürich.

Untersuchung von Raumheizungs-Fragen durch elektrische Modell-Abbildung

Von R. Czepek, Halstahammar (Schweden)

697.7:536.2.07.001.573

Mit Hilfe eines ursprünglich von L. C. Beuken angegebenen Abbildungsverfahrens wurden im Elektrowärme-Institut in Essen einige Messreihen durchgeführt, welche den Nachweis erbrachten, dass dieses Modellverfahren mit gutem Erfolge zu der Lösung von Raumheizungsfragen eingesetzt werden kann. Nach einer Erläuterung der Grundlagen des Aufbaues und der Abbildungsweise dieses «Beuken-Modells» werden Modellmessungen beschrieben, die zur Bestimmung des Heizwärmebedarfes und des Temperaturverlaufes bei intermittierender Heizung in Abhängigkeit von Bauweise und Benützungsdauer des Raumes, für einige ausgezeichnete Bauformen, führten. Eine andere Messreihe zeigt die Brauchbarkeit des Modellverfahrens bei der baulichen Gestaltung von Speicheröfen.

L'Institut d'électrothermie d'Essen a entrepris, au moyen du procédé de reproduction imaginé par L. C. Beuken, quelques séries d'essais, qui ont démontré que ce procédé peut être appliqué avantageusement pour résoudre certains problèmes de chauffage des locaux. Après avoir expliqué le principe de la construction et du fonctionnement de ce modèle de Beuken, l'auteur décrit des mesures, qui ont permis de déterminer la quantité de chaleur nécessaire et la courbe de température, dans le cas d'un chauffage intermittent, en fonction du genre de construction et de la durée d'occupation du local, pour quelques genres de locaux caractéristiques. Une autre série de mesures montre que ce procédé est également applicable à la construction des poêles à accumulation.

1. Einleitung

Hand in Hand mit der kulturellen Entwicklung des Menschen steigert sich auch sein Streben nach einem behaglichen Wohnen. Ein Haupterfordernis dazu ist die Schaffung eines gesunden und angenehmen Raumklimas durch eine zweckmässige Heizung. Die Frage der Raumheizung ist ein nie restlos lösbares Problem, selbst wenn es uns gelänge, sie in einer Weise zu lösen, die vollkommen unseren jetzigen Ansprüchen genügt, sondern wird immer durch die kulturellen und technischen Entwicklungsstadien des Menschen stark beeinflusst bleiben.

Wie sehr die bauliche Gestaltung einer Wohnung unmittelbar von der Wahl und Gestaltung der Heizeinrichtung abhängt und umgekehrt, kann nicht oft genug betont werden.

Besonders entscheidend ist die Frage der Bauweise bei der *unterbrochenen Heizung*. Hier handelt es sich um die Aufheizung der Raumluft und der Wände mit einer bestimmten Heizleistung und um das darauffolgende Auskühlen. Je nachdem, ob die Wände eine grosse Speichermasse darstellen oder nicht, nehmen sie viel oder wenig Wärme in sich auf, um sie dann beim Auskühlen teilweise wieder abzugeben. Ob es nun zweckmässig ist, bei bestimmten Heizpausen leichte Wände mit besonders gutem Wärmeschutz oder schwere, stark speichernde Wände einzubauen, hängt erstens von dem Verlauf der Raumtemperatur und zweitens von dem erforderlichen Wärmearaufwand ab. Während die Ermittlung des Wärmebedarfes von Räumen, welche dauernd mit konstanter Heizleistung beheizt sind, nicht schwierig ist und für alle praktisch vorkommenden Bauarten erfolgen kann¹⁾, ist die Berechnung bei unterbrochener Heizung praktisch

unmöglich, denn hier handelt es sich um eine nicht stationäre Wärmeströmung durch uneinheitliche Stoffe, deren mathematische Darstellung auf Differentialgleichungen höherer Ordnung führt, die nur in den einfachsten Fällen lösbar sind. Praktische Versuche mit unterbrochener Heizung bei verschiedenen Wandarten, aber stets gleichem Aussenklima und den gleichen übrigen Versuchsbedingungen wurden noch nicht durchgeführt und sind, ganz abgesehen von der dafür erforderlichen Zeit, fast unmöglich.

Da nun gerade bei der unterbrochenen Heizung, ganz gleich, um was für eine Heizenergie es sich handelt, vielfach Ersparnisse zu erwarten sind, lag es nahe, diese nichtstationären Wärmeströmungsvorgänge durch ein Modell abzubilden und zu untersuchen. Der Gedanke, Wärmeströme, welche ein System von verschiedenen gearteten Wandschichten durchströmen, durch elektrische Ströme, die ein analoges Gebilde, bestehend aus Widerständen und Kondensatoren, durchfliessen, abzubilden, ist nicht mehr ganz neu. Auf die Ähnlichkeit der Differentialgleichung der Wärmeleitung mit der für die elektrische Leitung und auf die sich daraus ergebenden Möglichkeiten wurde schon von englischen und deutschen Forschern vor dem Jahr 1910 hingewiesen. Allerdings befassen sich diese Vorschläge nur mit dem stationären Fall. Auf die Möglichkeit, diese Analogie auch auf nichtstationäre Vorgänge auszudehnen, wies zum erstenmal C. L. Beuken im Jahr 1936 hin [1]²⁾. Von ihm stammen auch die Vorschläge für den Aufbau des elektrischen Modells, das im Jahr 1939 im Elektrowärme-Institut in Essen erstellt und in seiner ursprünglichen Ausführung bereits an anderer Stelle beschrieben wurde [2].

¹⁾ s. DIN Nr. 4701.

²⁾ s. Literaturverzeichnis am Schluss.

2. Grundlagen des Abbildungsverfahrens

Zum Verständnis der Abbildungsweise und der Möglichkeiten dieser Methode ist eine kurze Einführung in das Wesen des Abbildungsverfahrens nötig (Tabelle I).

zelen ableiten zu wollen, sind in der Tabelle I unter Ziff. 2 wieder die entsprechenden wärmetechnischen und elektrischen Gleichungen, nach welchen sich Leitung, Ladung und Ausgleich vollziehen, gegenübergestellt. Durch Vergleich der Gleichung 2w

Grundgleichungen für thermische und induktionsfreie elektrische Strömungen

Tabelle I

Wärmeströmung			Elektrische Strömung		
1. Stationäre Strömung					
1w	$Q = \frac{\lambda}{s} A \cdot \Delta \vartheta$ oder: $Q = \frac{\Delta \vartheta}{W}$		1e	$I = \frac{\gamma}{l} q U$ oder: $I = \frac{U}{R}$	
2. Nichtstationäre Strömung					
2w	a) Wärmeleitung $q_x = \lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial x}$		2e	a) Elektrische Leitung $S_x = \frac{1}{r_0} \cdot \frac{\partial U}{\partial x}$	
3w	b) Wärmespeicherung $\frac{\partial q_x}{\partial x} = c \gamma \frac{\partial \vartheta}{\partial t}$		3e	b) Elektrische Aufladung des Kondensators $\frac{\partial S_x}{\partial x} = c_0 \frac{\partial U}{\partial t}$	
4w	c. Wärmeausgleich $\frac{\partial^2 q_x}{\partial x^2} = \frac{c \gamma}{\lambda} \cdot \frac{\partial q_x}{\partial t_e}$		4e	c) Elektrischer Strömungsausgleich (Telegraphengleichung) $\frac{\partial^2 S_x}{\partial x^2} = r_0 c_0 \frac{\partial S_x}{\partial t_e}$	
5w	$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} = \frac{c \cdot \gamma}{\lambda} \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t_e}$		5e	$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = r_0 c_0 \frac{\partial U}{\partial t_e}$	
Symbol		Einheiten	Symbol		Einheiten
Q	Wärmestrom	kcal/h	I	Elektrischer Strom	A
λ	Wärmeleitfähigkeit	kcal/m · Grad · h	γ	Elektrische Leitfähigkeit	m/Ω mm ²
s	Wandstärke	m	l	Leiterlänge	m
A	Wandfläche	m ²	q	Leiterquerschnitt	mm ²
$\Delta \vartheta$	Erwärmung	Grad	U	Spannung	V
W	Wärmeleitungswiderstand	h · Grad/kcal	R	Widerstand	Ω
q_x	Wärmestromdichte (x-Achse)	kcal/m ² h	S_x	Stromdichte (x-Achse)	A/cm ²
$c \gamma$	Spez. Wärmekapazität	kcal/m ³ · Grad	$c_0 = C/s$	Spez. Kapazität	F/cm ³
$\frac{\lambda}{c \cdot \gamma} = a$	Temperaturleitwert	m ² /h	$\frac{1}{r_0 c_0}$	Spez. elektrischer Leitwert	cm ³ /Ω · F
t_e	Zeit (in der Wärmetechnik)	h	$r_0 = R/s$	Spez. Widerstand d. Längeneinh.	Ω/cm
			t_e	Zeit (in der Elektrotechnik)	s

a) Analoge Beziehungen

α) Stationäre Strömungen

Betrachten wir zunächst rein äusserlich die Gleichung 1w, nach welcher die *Wärmeleitung* durch eine ebene Platte im Beharrungszustande erfolgt, und daneben die Formel 1e, welche für den *Stromdurchgang* durch einen Ohmschen Widerstand gilt (Ohmsches Gesetz), so ist die Ähnlichkeit augenscheinlich. Abgesehen von den physikalischen Dimensionen, ist ersichtlich, dass dem Wärmestrom Q der elektrische Strom I , der Wärmeleitfähigkeit λ die elektrische Leitfähigkeit γ und der Temperaturdifferenz $\Delta \theta$ die Potentialdifferenz U entsprechen.

β) Nichtstationäre Strömungen

Ebenso augenscheinlich ist auch die Analogie im nichtstationären Falle, also bei allen Anheiz- und Auskühlvorgängen. Ohne die Gleichungen im ein-

mit Gleichung 2e ist ersichtlich, dass im Falle der Leitung dem Wärmestrom je Flächeneinheit in der x -Achse q_x die elektrische Stromdichte in der x -Richtung S_x , der Wärmeleitfähigkeit λ der Reziprokwert des spezifischen elektrischen Widerstandes, bezogen auf die Längeneinheit r_0 , und der Temperaturzunahme $\partial \theta$ auf dem Wege ∂x die Spannungsänderung ∂U auf dem Wege ∂x formal entsprechen. Die gleiche Analogie weisen die Formeln 3...5 auf.

b) Grundsätzlicher Aufbau des Beuken-Modells

Auf Grund dieser allerdings bloss formellen Analogie kam C. L. Beuken [1] auf den Gedanken, einen nichtstationären Wärmestrom durch irgendeine Wand durch einen elektrischen Strom, welcher ein elektrisches Modell, bestehend aus Widerständen und Kondensatoren, durchfliesst, abzubilden.

In Fig. 1 ist zunächst links die Aufheizung einer Wand, rechts der analoge Fall in der Elektrotechnik, die Aufladung eines Kabels, dargestellt. Dem Wärmedurchgangswiderstand der Wand entspricht der elektrische Widerstand des Kabels, der Wärmespeicherung die elektrische Kapazität. Ganz ähn-

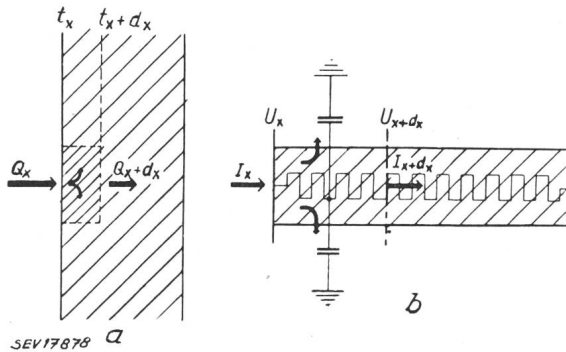


Fig. 1

Analogie zwischen der Aufheizung einer Wand a und der Aufladung eines Kabels b (nach W. Fischer)

- I_x dem Wärmestrom Q_x entsprechender elektrischer Strom an der Stelle x
- $I_x + dx$ dem Wärmestrom $Q_x + dx$ entsprechender elektrischer Strom an der Stelle $x + dx$
- U_x der Temperatur t_x entsprechende Spannung gegen Erde an der Stelle x
- $U_x + dx$ der Temperatur $t_x + dx$ entsprechende Spannung gegen Erde an der Stelle $x + dx$

lich wie die Daten der Wand können natürlich auch die Wärmeübergangswiderstände von der Luft an die Wand sowie die Luft selbst durch entsprechende elektrische Widerstände, beziehungsweise Kondensatoren berücksichtigt werden. Bei dem Modellversuch wird der elektrische Strom, der den Wärmestrom versinnbildlicht, mit einem entsprechenden Ampèremeter und die elektrische Spannung, welche die Temperaturdifferenz darstellt, mit beinahe verlustfreien, also z. B. statischen Voltmetern gemessen. Um ähnlich, wie in Fig. 1 gezeigt ist, für jede beliebige Wandschichtung rasch

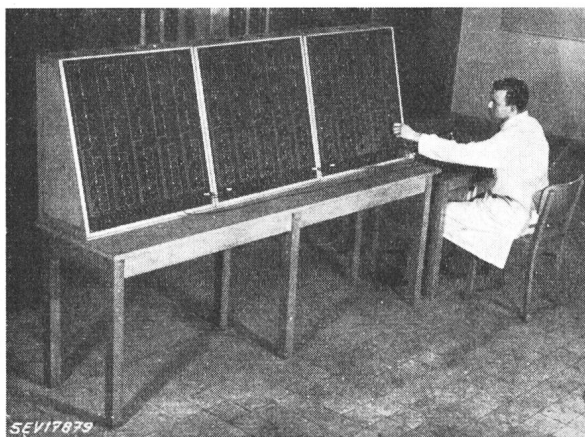


Fig. 2

Das Beuken-Modell

und sicher ein elektrisches Modell aufbauen zu können, wurde im Elektrowärme-Institut Essen das in Fig. 2 dargestellte System aus Widerständen und Kondensatoren hergestellt. Durch entsprechendes Zu- und Abschalten von dekadisch unter-

teilten Widerständen war jedes der 15 Widerstandsfelder auf einen Wert zwischen 10^2 und $10^6 \Omega$ mit Hilfe von Drehschaltern einstellbar. Ähnlich waren auch die Kapazitäten von $0,1 \dots 100 \mu F$ je Feld angeordnet.

c) Maßstabgleichungen und Bestimmung der Modellwerte

Um nun für irgend einen Körper, dessen Erwärmung oder Abkühlung bestimmt werden soll, ähnlich wie dies in Fig. 1 angedeutet ist, das entsprechende elektrische Modell zusammenzustellen, müssen aus den in Tabelle I wiedergegebenen analogen Gleichungen Maßstabgleichungen abgeleitet werden, welche es gestatten, auf Grund der bekannten Materialkonstanten λ , c , γ und der Abmessungen des betreffenden Körpers sein elektrisches Abbild, bestehend aus Widerständen und Kapazitäten, zu schalten.

Diese Maßstabgleichungen lauten:

$$\text{für den Strom: } i = \frac{I}{q} \text{ [A/kcal/m}^2\text{h]} \quad (6)$$

$$\text{für die Spannung: } u = \frac{U}{\Delta\theta} \text{ [V/Grad]} \quad (7)$$

$$\text{für die Zeit: } t = \frac{t_e}{t_w} \left[\frac{s}{h} \right] \quad (8)$$

Soll z. B. ein ebenes Wandstück von der Dicke s mit den Kennzahlen λ , c und γ abgebildet werden, so ergeben sich aus den Gleichungen (2...8) die Widerstands- und Kapazitätswerte im Modell wie folgt:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{u \cdot \Delta\theta}{i \cdot q} = \frac{u \cdot \Delta\theta}{i \cdot \frac{\lambda}{s} \cdot \Delta\theta} = \frac{u}{i \lambda} s \text{ } [\Omega] \quad (9)$$

$$C = \frac{I}{\frac{\partial U}{\partial t_e}} = \frac{i \cdot q}{u \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t_w}} = \frac{i \cdot t \cdot c \cdot \gamma}{u} s \text{ [F]} \quad (10)$$

$$r_0 c_0 = \frac{t}{a} \quad (11)$$

Werden von den fünf unbekannten Größen: U , i , t , r_0 , c_0 drei, z. B. U , i und t gewählt, so sind die Widerstands- und Kapazitätswerte eindeutig durch die Materialgrößen s , c und γ bestimmt.

Die Wahl des Spannungs-, Strom- und Zeitmassstabes kann unter Berücksichtigung der im Modellsystem eingebauten und auf verschiedene Werte einstellbaren Widerstände und Kondensatoren so getroffen werden, dass der ganze Abbildungsvorgang einer ganzen Tage oder auch Monate dauernden Wärmeströmung in wenigen Sekunden oder Minuten abläuft, woraus schon einer der grossen Vorteile der Methode ersichtlich ist.

d) Abbildungsmöglichkeiten im ein-, bzw. dreidimensionalen System

Die Gleichungen (1...5) gelten für Strömungen, welche eine unendlich ausgedehnte Platte von der

Dicke s senkrecht durchsetzen. Diese eindimensionale Darstellung gestattet neben der Abbildung ebener Platten auch die unendlich langer Zylinder und Hohlkugeln.

Soll eine Wärmeströmung durch die Wandung eines unendlich langen Hohlzylinders vom Aussendurchmesser D_a und Innendurchmesser D_i abgebildet werden, dann ist in die oben angeschriebene Formel (1) im Falle der Wärmeleitung statt der Wandstärke s die reduzierte Wandstärke:

$$s_z = \frac{D_0}{2} \ln \frac{D_a}{D_i} \quad (12)$$

zu setzen, wobei D_0 den Durchmesser der konzentrischen Bezugsfläche bedeutet. Hatte man für die ebene Platte von der Dicke $s = \frac{D_a - D_i}{2}$ die Modellkapazität C errechnet, so ist die für den entsprechenden Hohlzylinder reduzierte Kapazität:

$$C_z = C \frac{D_a + D_i}{2 D_0} \quad (13)$$

In ähnlicher Weise erhält man für die Abbildung eines hohlkugelförmigen Körpers die Reduktionsformeln für die Hohlkugelwandstärke s_k und Hohlkugelkapazität C_k :

$$s_k = \frac{D_0^2}{2} \left(\frac{1}{D_i} - \frac{1}{D} \right) \text{ und} \quad (14)$$

$$C_k = C \frac{D_i^2 + D_i \cdot D_a + D_a^2}{3 D_0^2} \quad (15)$$

Sollen Strömungen im dreidimensionalen System untersucht werden, so kann die Hauptzahl aller in Frage kommenden Aufgaben durch Zurückführung auf die ebene, zylindrische oder kugelförmige Darstellung gelöst werden.

e) Messweise und Messmittel

Bei fast sämtlichen Anheizvorgängen in der Wärmetechnik haben wir 2 Hauptfälle zu unterscheiden:

1. Die Aufheizung mit einer konstanten Heizleistung, also mit einem konstanten Strom.
2. Die Regelung auf eine bestimmte einzuhaltende Temperatur, also auf eine bestimmte elektrische Spannung.

Diese beiden Fälle sind nun im Modell entsprechend durchzuspielen. Zu diesem Zweck ist im ersten Falle ein konstanter Strom in das elektrische Modell zu schicken, im zweiten Falle ist nach Erreichung einer bestimmten Temperatur, beziehungsweise Spannung, diese Spannung konstant zu halten. Beim Aufladen der Kondensatoren sind diese im Augenblick des Einschaltens gleichsam kurzgeschlossen. Erst allmählich nimmt die gegen elektromotorische Kraft zu, und der Scheinwiderstand des ganzen Systems steigt an. Soll daher in dieses System ein konstanter Strom fließen, so muss man die angelegte Spannung entsprechend regeln. Die Regelung kann von Hand mittels eines Potentiometers erfolgen, dies ist aber nicht zweckmässig und ungenau. Viel besser lässt sich die Stromkonstanzhaltung mit einer Elektronenröhrenschaltung, ähnlich

der Schaltung in Fig. 3, durchführen. Durch positive, beziehungsweise negative Aufladung des Steuergitters G einer Röhre R , deren innerer Widerstand gemäss den hohen Modellwiderständen auch möglichst hoch sein soll, kann ein konstanter Anodenstrom von beliebiger Höhe eingestellt werden. Wäh-

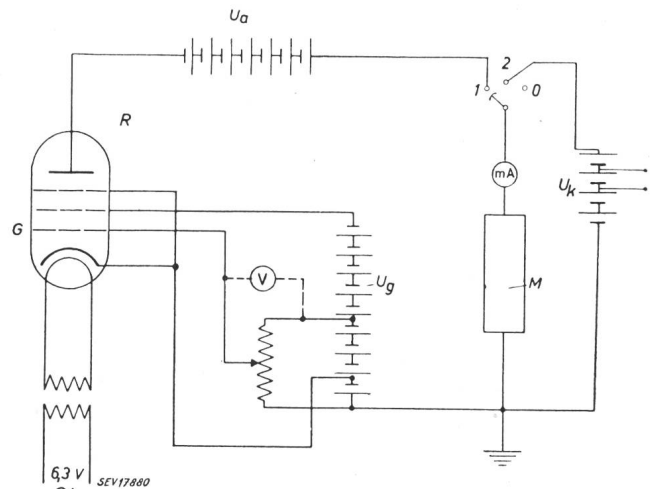


Fig. 3
Schaltbild der röhrengesteuerten Einrichtung zur Konstanthaltung von Modellströmen und Modellspannungen
 R Pentode mit hohem Innenwiderstand; G Steuergitter; M Modell; U_a Anodenspannung; U_g Gitterspannung; U_k konstante Spannungsquelle mit verschiedenen Anzapfungen

rend dieses Aufheizvorganges mit konstantem Strom kann man mit statischen oder Röhren-Voltmetern an beliebigen Stellen des Systems Spannungen (Temperaturen) abtasten. Soll nun nach einer gewissen Zeit eine bestimmte Spannung gleichbleiben, dann muss mit Hilfe eines Umschalters vom konstanten Strom auf konstante Spannung, also auf eine konstante Spannungsquelle, umgeschaltet werden.

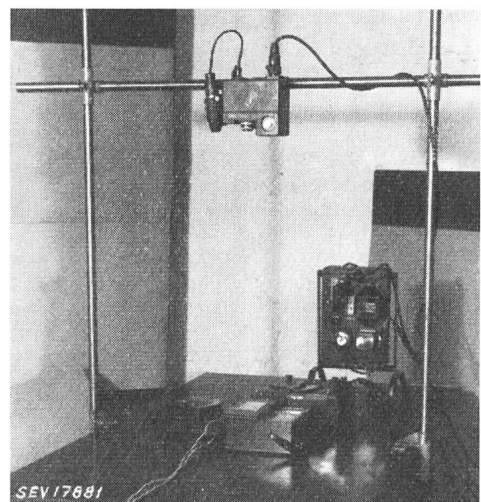


Fig. 4
Anordnung der Instrumente zur Versuchsauswertung mit Hilfe einer Registrierkamera

Da es, wie bereits erwähnt, ein besonderer Vorteil des Abbildverfahrens ist, den Zeitmaßstab so zu wählen, dass er nur einen Bruchteil des tatsäch-

lichen Zeitmaßstabes im wärmetechnischen Problem darstellt, ergibt sich somit der Fall, dass in wenigen Sekunden die elektrischen Werte für Strom und Spannungen zugleich festzuhalten sind. Für diese Messung wurde mit gutem Erfolg eine photographische Einrichtung angewendet, die aus der Fig. 4 ersichtlich ist. Das Ampèremeter und sämtliche Voltmeter werden samt einer Stoppuhr mit Hilfe einer Registrierfilmkamera in Zeitintervallen von 0,5...10 s aufgenommen. Dem entwickelten Filmstreifen werden dann mittels eines Projektors die Messwerte, frei von subjektiven Ablesefehlern, entnommen. So können auch komplizierte Messreihen bequem und genau von einer einzigen Person durchgeführt werden. Zur Strommessung dienten Präzisions-Drehspulinstrumente mit einer Empfindlichkeit von 10^{-6} A pro Skalenteil. Die Spannungen wurden, da entsprechende Röhrevoltmeter nicht verfügbar waren, mit elektrostatischen Voltmetern gemessen, die bei einem Messbereich von 125 V eine Genauigkeit von $\pm 2\%$ und eine Einschaltdauer von 1...2 s besaßen. Mit Rücksicht auf die Toleranzen der Widerstände und Kondensatoren dieses Modells, ferner auf die Genauigkeit der vorhandenen Ableseinstrumente, kann die Fehlermöglichkeit für die meisten hier untersuchten Fälle mit zirka 5% angegeben werden. Dementsprechend sind auch die Versuchsergebnisse selbst ausgewertet.

3. Bestimmung des Heiz-Wärmebedarfes und des Temperaturverlaufes bei verschiedenen Wandarten und Heizpausen

a) Aufgabenstellung

Es war festzustellen, welche Ersparnisse bei verschiedenen Heizpausen durch mehr oder minder guten Wärmeschutz und durch grössere oder geringere Wärmespeicherung der Begrenzungswände eines Raumes zu erreichen sind. Da die rechnerische Verfolgung dieser nichtstationären Wärmeströmung durch mehrfach geschichtete Wandungen praktisch unmöglich ist, sollte diese Aufgabe durch elektrische Modellabbildung gelöst werden.

Folgende Bauformen wurden zunächst untersucht:

α) Ein Raum, von allen Seiten von einer 38 cm dicken Ziegelmauer umgeben. Ein Viertel der Flächen ist mit Doppelfenstern bedeckt.

β) Ein Raum, von allen Seiten von einer Holzwand umgeben, sonst wie unter α .

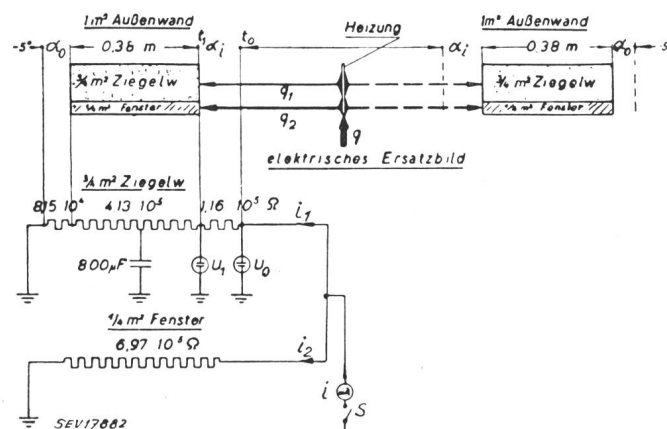
γ) Ein Raum, von allen Seiten von einer dünnen Ziegelmauer umgeben, die mit einer Wärmedämmschicht aus Heraklith ausgekleidet ist (sonst wie unter α).

Die Stärke dieser verschiedenen Wände wurde so gewählt, dass im Beharrungszustand stets der gleiche Wärmeverlust auftritt. Die Aussentemperatur wurde für alle Versuche mit -5°C angenommen, so dass bei einer Innentemperatur von 20°C die Temperaturdifferenz 25°C betrug. Für andere Aussentemperaturen können proportional die Ergebnisse der Temperaturmessung umgerechnet werden.

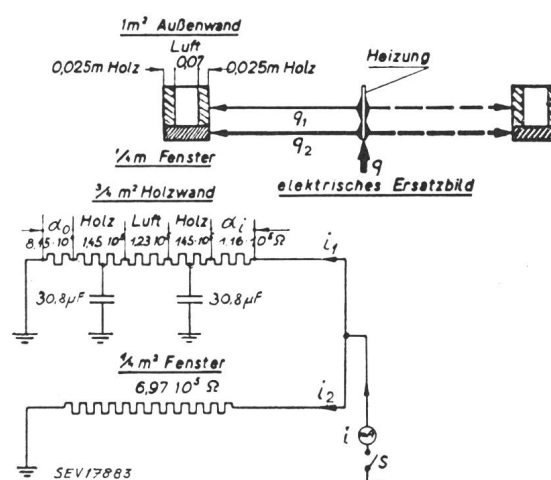
b) Abbildungsweise

Zur Vereinfachung dieser Messungen wurde hier das räumliche Problem auf ein lineares zurückge-

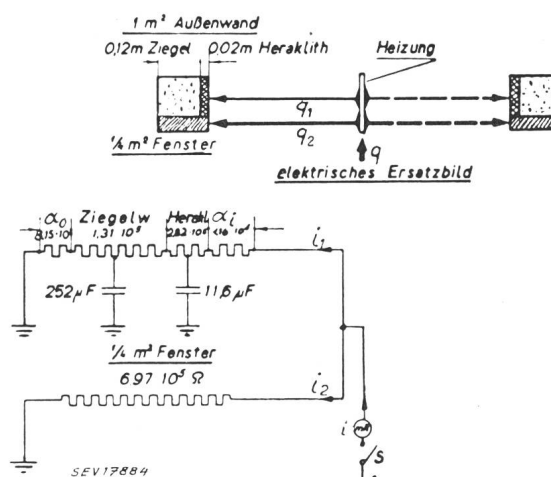
führt, und zwar so, dass jeweils nur der Wärmestrom, welcher 1 m^2 Wandfläche senkrecht durchströmt, zur Abbildung gelangte. Als Heizkörper wurde eine gleich grosse parallele und praktisch trägheitslose



a) Ziegelwand



b) Holzwand



c) Ziegelwand mit Heraklith-Innenauskleidung

Fig. 5

Bauliche Anordnung und Modellbilder

q Heizleistung entsprechend dem Strom i ; q_1 Wärmeverlust der Wand entsprechend dem Teilstrom i_1 ; q_2 Wärmeverlust des Fensters entsprechend dem Teilstrom i_2 ; t_0 Raumtemperatur entsprechend der Spannung U_0 ; t_i Temperatur der inneren Wandoberfläche entsprechend der Spannung U_i ; α_t Wärmeübergangswiderstand zwischen der Wand und Raumluft entsprechend $1,16 \cdot 10^5 \Omega$; α_a Wärmeübergangswiderstand zwischen Wand und Aussenluft entsprechend $8,15 \cdot 10^4 \Omega$.

Fläche angenommen. Die Wärmekapazität der Raumluft fand bei diesen Messungen keine Berücksichtigung.

Fig. 5 zeigt die bauliche Anordnung und die Ersatzbilder dieser drei Fälle. Die Fensterverluste, welche einen erheblichen Anteil an den gesamten Verlusten haben, sind als parallele Ableitwiderstände dargestellt. Die Fenstergrösse wurde mit $\frac{1}{4}$ der gesamten Raumgrösse angenommen. Die Grösse des Wärmedurchgangswiderstandes der Fenster entspricht den DIN-Vorschriften 4701 für Doppel Fenster in Holzrahmen mit normalen Fugen. Der Wärmeübergang durch Konvektion wurde ebenfalls durch einen elektrischen Widerstand abgebildet, dessen Grösse aus den Beziehungen

$$q = \alpha \Delta \vartheta \quad \text{und} \quad I = \frac{U}{R_x} \quad \text{folgt:}$$

$$R_x = \frac{u}{i} \frac{l}{\alpha}$$

(α ist die Wärmeübergangszahl in kcal/m²h)

c) Betriebsweise

Es wurde angenommen, dass der Raum durch eine elektrische Heizeinrichtung binnen 2 h so aufgeheizt wird, dass in dieser Zeit die mittlere Raumtemperatur 20°C beträgt. Dann wird bis zum Eintreten der Heizpause durch Leistungsverminderung die Temperatur von 20°C konstant gehalten. Es wurden folgende Heizpausen modellmässig untersucht: 4, 12 und 20 h pro Tag.

d) Versuchsdurchführung

In einer Zeit von 10 s, welche mit den gewählten Maßstäben 2 h tatsächlicher Aufheizung entspra-

der Heizung entsprechen sollte, gespeist. Nach Ablauf mehrerer Perioden (Tage) stellte sich ein quasistationärer Zustand ein, das heisst, dass zum Beispiel am Ende einer jeden Heizpause die gleichen Spannungswerte auftraten. War dann mit der gewählten Anschlussleistung nach 10 s (2 h) die mittlere Raumtemperatur niedriger oder höher als 20°C, so musste der Strom entsprechend erhöht oder verringert und das ganze Spiel wiederholt werden. Wenn man bedenkt, dass zum Beispiel bei der massiven Ziegelmauer mitunter 360 h erforderlich sind, um nur bei einer der gewählten Leistungen den quasistationären Zustand zu erreichen, was im Modell in $\frac{1}{2}$ h abgespielt werden konnte, so ist es schon zu ermessen, welche Vorteile dieses Verfahren zu bieten vermag.

Nach Ablauf der Aufheizzeit musste auf konstante Spannung umgeschaltet und schliesslich die Stromquelle ganz abgeschaltet werden. Alle 2...5 s wurden festgehalten:

1. die Stromwerte im Speisepunkt des elektrischen Systems, welche der auf 1 m² Aussenfläche bezogenen Wärmemenge entsprachen;
2. die Spannungswerte U_0 zwischen Speisepunkt und Erde, welche dem Temperaturunterschied zwischen Raum und Aussenluft entsprachen, und
3. die Spannungswerte U_1 , welche dem Unterschied zwischen der Temperatur der inneren Wandoberfläche und der Aussenlufttemperatur proportional waren.

e) Ergebnisse

Die Heizleistungs- und Temperaturwerte einer derartigen Periode nach Erreichen des quasistationären Zustandes sind für jeden der 3 genannten Fälle in Fig. 6 graphisch wiedergegeben. Je 3 nebeneinanderliegende Diagramme stellen für eine Wandart die Betriebswerte bei 4-, 12- und 20stündiger Heizpause dar.

Die Raumtemperatur t_0 steigt in allen Fällen in 2 h auf 20°C. Beim Abschalten der Heizung sinkt t_0 plötzlich auf den Wert t_1 der Wandtemperatur und geht dann mit dieser auf den tiefsten Wert zurück. Dieses Zusammenfallen von t_0 und t_1 ist auf die Vernachlässigung der Wärmespeicherung der Luftmasse und der Heizkörper zurückzuführen. Je

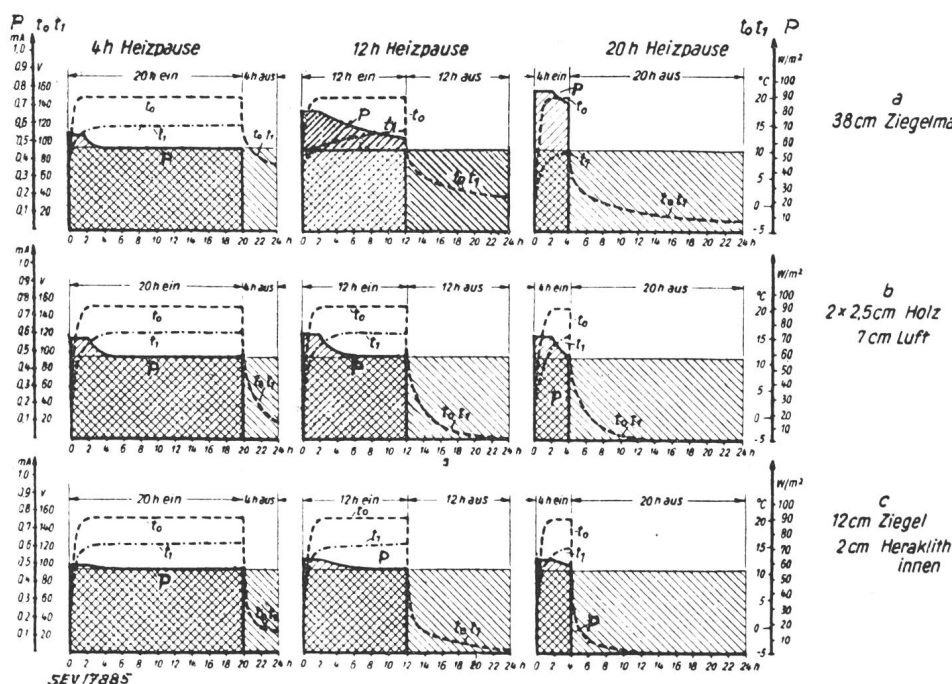


Fig. 6
Verlauf von Temperatur
und Heizleistung bei
4, 12 und 20 h Heizpause

■ tatsächlicher
Heizwärmeaufwand
■ Heizwärmeaufwand
bei Dauerheizung
P Leistung
t₀ Raumtemperatur
t₁ Wandtemperatur

chen, wurde das Modell durch die Stromkonstanthaltungseinrichtung nach Fig. 3 mit einem vorher geschätzten Strom, welcher der Anschlussleistung

länger die Heizpause ist, desto tiefer sinkt t_0 und t_1 ab und um so grösser muss der Anschlusswert des Heizkörpers sein, um die Raumtemperatur in 2 h

wieder auf 20 °C zu bringen. Bei längeren Heizpausen bleibt die Wandtemperatur bei der massiven Ziegelmauer auch am Ende der Heizzeit immer mehr zurück. Bei der leichten Bauweise (b und c), ist das anders. Obwohl die Auskühlung in den Pausen grösser ist, kommen doch Wand- und Lufttemperatur viel rascher hoch und erreichen selbst bei 20stündiger Heizpause noch genau den gleichen Endwert wie bei 4stündiger Heizpause. Der Anschlusswert beträgt beim Fall a und 20 h Pause ungefähr das 1,5fache wie bei 4 h Pause. Bei b und c dagegen ist er bloss zirka 1,05mal so hoch wie bei 4stündiger Pause. Der Gesamtverbrauch ist durch die Fläche unter der Leistungslinie P bestimmt. Die möglichen Ersparnisse gegenüber der Dauerheizung sind am interessantesten. Der Dauerwärmeverbrauch pro Tag ist durch die Rechteckfläche, welche oben von der Beharrungsleistung abgegrenzt ist, gegeben. In Fig. 6 ist es die von links oben nach rechts unten schraffierte Fläche. Das Verhältnis der beiden Flächen ist ein Mass für die erzielbaren Ersparnisse. Dieser relative Heizwärmebedarf ist in Fig. 7 graphisch dar-

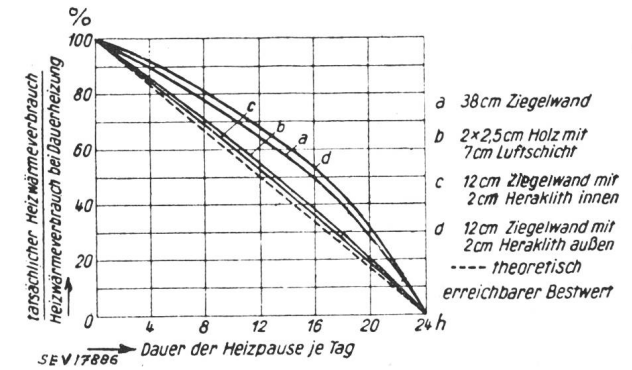


Fig. 7
Mögliche Ersparnisse an Heizwärme bei unterbrochener Heizung gegenüber Dauerheizung bei 0 bis 24 h täglicher Heizpause

gestellt. Der theoretisch günstige Fall wäre die Gerade. Dass Bauart b und c diesem optimalen Falle sehr nahekommen, ist ersichtlich. Bei 12stündiger Pause braucht der Raum mit Holzwand knapp 55%, der Raum mit innen angebrachter Heraklithschicht (Fall c) nur 53% des Tagesverbrauches bei Dauerheizung. Bei massiven Ziegelmauern dagegen werden 64% benötigt. Ein weiterer Versuch (d), bei dem die Heraklithschicht aussen statt innen angeordnet wurde, ergab, dass der Verbrauch sogar 68% beträgt. Diese Bauweise ist auf alle Fälle ungünstig. Ähnlich wie die Tagesverbrauchszahlen verhalten sich auch die Heizleistungen (Fig. 8).

Bei weiteren Rückschlüssen aus diesen Versuchsergebnissen darf man folgendes nicht übersehen: In allen 3 Fällen wurde angenommen, dass der Raum allseitig von Aussenwänden umgeben sei, während praktisch fast immer auch benachbarte und ebenfalls beheizte Räume vorhanden sind. Die Trennwände, Boden und Decke, stellen aber eine gewisse Speichermasse dar, deren Einfluss auf den ganzen Wärmeströmungsvorgang nicht vernachlässigt werden darf, will man praktisch brauchbare Werte erhalten. Daher wurde diese erste Messreihe durch eine weitere ergänzt, in der der Raum a

ausser von Aussenwänden, wie aus dem Modellbild Fig. 9 ersichtlich ist, auch noch von flächengleichen Innenwänden (12 cm stark) umgeben wird (Fall e). Das Ergebnis dieser Messungen zeigt Fig. 10. Der

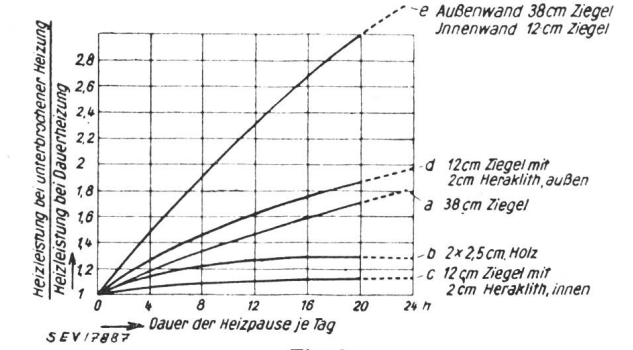


Fig. 8
Erforderliche Erhöhung der Heizleistung bei unterbrochener Heizung gegenüber Dauerheizung bei 0 bis 24 h täglicher Heizpause

schon gezeigte Verlauf für die Aussenwand a aus Fig. 6 ist hier wiederholt. Die Raumtemperatur t_0 bleibt infolge der erhöhten Speicherung am Ende der Pausen etwas höher. Um der Wirklichkeit noch etwas näher zu rücken, wurde dann noch ein Raum (Fall f) abgebildet, der neben Aussen- und Innenwand auch noch Decke und Boden enthielt. (Die Summe der Wandflächen war ungefähr doppelt so gross wie die der Boden- und Deckenfläche.)

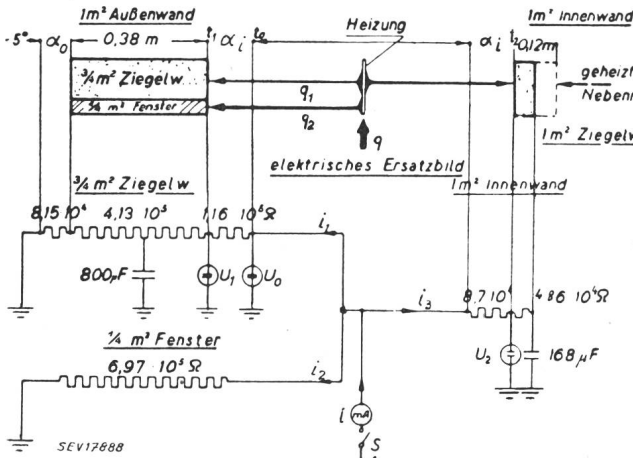


Fig. 9
Bauliche Anordnung und Modellbild für den Fall e
 t_1 Temperatur der inneren Oberfläche der Aussenwand entsprechend der Spannung U_1
 t_2 Temperatur der inneren Oberfläche der Innenwand entsprechend der Spannung U_2
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 5

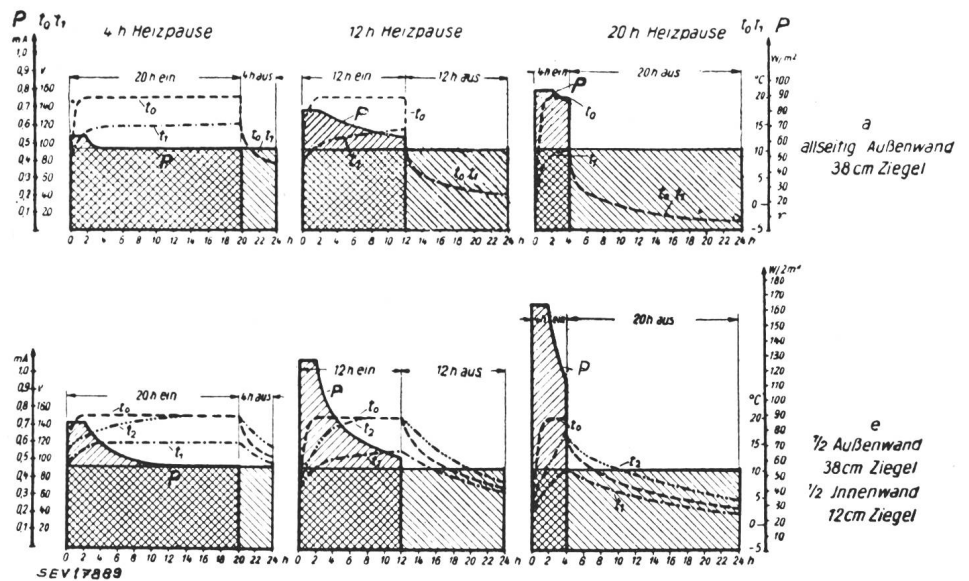
In Fig. 11 ist für diese zuletzt erwähnten Fälle e und f der relative Heizwärmebedarf dargestellt. Bei 12stündiger Heizpause betrug der Tagesverbrauch bei allseitiger Ziegelaussenwand 64% der Dauerheizung und geht unter Einbeziehung der Innenwände auf 80% und unter Einbeziehung von Innenwand, Boden und Decke sogar auf 84% hinauf. Bei der Leichtbauweise, unter Einbeziehung von Innenwänden und Fussboden, dürfte der Unterschied lange nicht so krass sein, doch sind diese Versuche noch nicht gemacht.

Das Absinken der Raumlufttemperatur in Abhängigkeit von der Dauer der Heizpause bei den 6 verschiedenen Raumaufbauten zeigt Fig. 12. Gerade die hinsichtlich des Wärmebedarfs so günstig abschneidenden Bauarten *b* und *c* weisen ein sehr rasches Absinken der Raumtemperatur nach dem Abschalten der Heizung auf.

Da für das Wohlbefinden in einem geheizten Raum nicht nur die Lufttemperatur, sondern be-

dem Abschalten der Heizung, und vergleicht man diesen Wert mit dem optimalen Wert $B = 0,128$, so erhält man Fig. 13. Während B bei den Bau-

Fig. 10
Verlauf von Temperatur und Heizleistung für den Fall *a* und *e* bei 4, 12 und 20 h Heizpause
Bezeichnungen siehe Legende Fig. 6



kanntlich auch die Temperatur der Wandinnenflächen massgebend ist, sollen die Ergebnisse noch kurz unter Berücksichtigung der sogenannten Behaglichkeitszahl B beurteilt werden. Nach *Bradtko*

weisen *a* und *e* mit zunehmender Heizpause ziemlich stark absinkt, zeigen die Konstruktionen *b* und *c* fast unveränderliche Behaglichkeitszahlen, auch bei längeren Pausen.

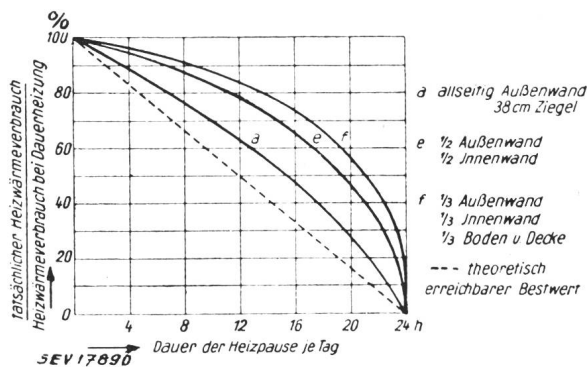


Fig. 11
Mögliche Ersparnisse an Heizwärme bei unterbrochener Heizung gegenüber Dauerheizung bei 0 bis 24 h täglicher Heizpause

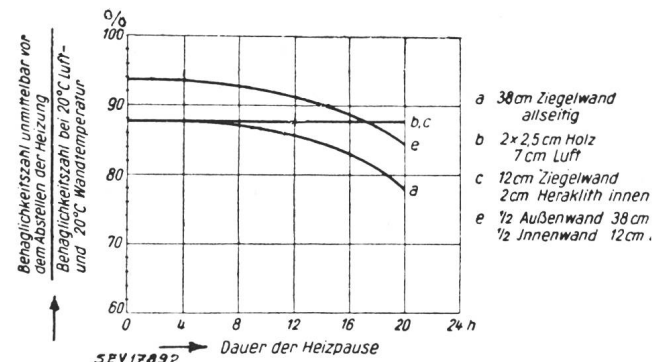


Fig. 13
Behaglichkeitszahlen im Augenblick des Abschaltens der Heizung im Verhältnis zur Behaglichkeitszahl bei 20°C Luft- und Wandtemperatur bei 0 bis 24 h täglicher Heizpause

ist für 20°C Lufttemperatur und 20°C Wandtemperatur die Behaglichkeitszahl $B = 0,128^3$). Berechnet man mit Hilfe der modellmässig bestimmten Grössen die Zahl B für den Zeitpunkt unmittelbar vor

Diese Messungen haben den entsprechenden Einfluss von Wärmespeicherung und Wärmeschutz bei der unterbrochenen Heizung bewiesen. Weitere Messungen, die dem praktischen Falle immer näher kommen, werden dazu beitragen, eine Reihe von bisher offenen Fragen bei der unterbrochenen Raumheizung zu klären.

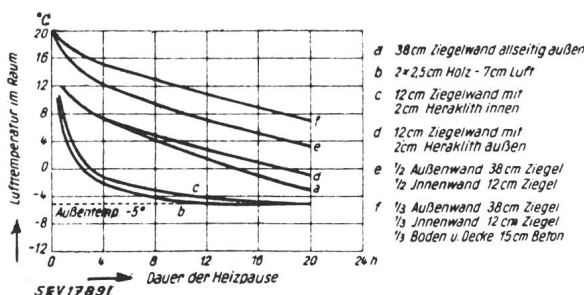


Fig. 12
Absinken der Lufttemperatur im Raum in Abhängigkeit von der Dauer der Heizpause

$$^3) B = \frac{t_0}{\alpha_s (36,5 - t_1) + \alpha_k (36,5 - t_0)}$$

4. Untersuchung von elektrischen Speicheröfen, deren Bemessung und Aufbau in Abhängigkeit von der Raumbeschaffenheit und der Betriebsweise

a) Aufgabenstellung

Speicheröfen haben den Zweck, unter Ausnützung billigen Nachtstromes so viel Wärme aufzuspeichern, dass mit diesem Wärmeverrat der Tageswärmebedarf des Raumes ganz oder teilweise gedeckt wird. Der Hauptbestandteil eines derartigen Ofens muss notwendigerweise seine Speichermasse

sein. In Frage kommen keramische und metallische Stoffe sowie Flüssigkeiten. Je grösser das Produkt aus $c \cdot \gamma$ ist, um so mehr Wärme kann man aufspeichern und um so geeigneter ist der Baustoff. Während der Heizperiode dringt die Temperaturwelle von dem Heizkörper allmählich nach aussen. Wie rasch dies geht, hängt von der Speichermasse und von den Dimensionen des Ofenkörpers ab. Der zweckmässigste Ofen wird jener sein, dessen Oberflächentemperatur zugleich oder sogar erst nach Beendigung der Heizperiode den höchsten Wert erreicht und auch während der Heizpause nur wenig absinkt. Da zwischen dem Ofen und den Raumwänden stets ein Wärmeaustausch stattfindet, hängt der Verlauf der Oberflächentemperatur und auch der Raumlufttemperatur nicht nur von der Gestaltung und Betriebsweise des Ofens, sondern auch von der Beschaffenheit der Wände, des Bodens und der Decke ab. Die richtige Bemessung eines derartigen Ofens kann bei gegebener Raumbeschaffenheit und meist vom Energieversorgungsunternehmen vorgeschriebener Betriebszeit mit Hilfe des elektrischen Modells erfolgen. Im folgenden soll an Hand einiger Messungen angedeutet werden, wie man bei der modellmässigen Festlegung der stofflichen und konstruktiven Gestaltung von Speicheröfen vorgehen kann.

b) Abbildungsweise

Im Gegensatz zu der eben besprochenen Versuchsreihe, wo die Wandflächen als ebene Wände abgebildet waren, ist hier, wie aus Fig. 14 ersichtlich

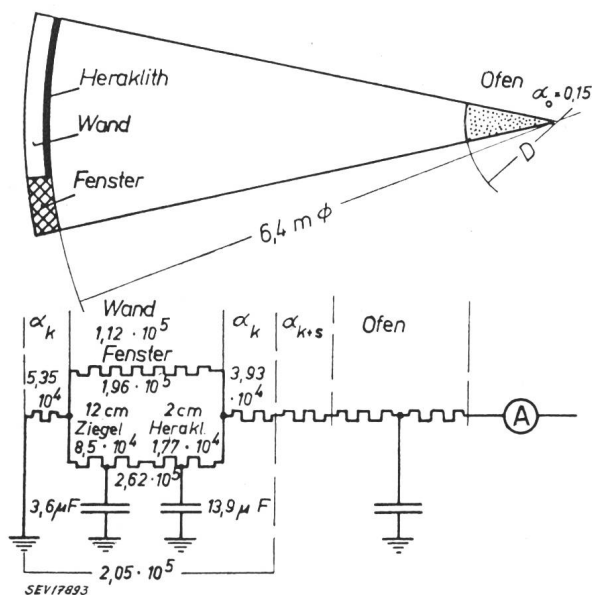


Fig. 14

Abbildungsweise eines Speicherofens, der zur Beheizung eines innen mit Heraklith ausgekleideten Raumes dient
Zylindrische Darstellung

ist, der Ofen als ein Zylinder, der in der Mitte des Raumes steht, dargestellt. Die Wände wurden als konzentrischer Hohlzylindermantel angenommen. Um alle Werte auf 1 m² Oberfläche beziehen zu können, wurden 1 m² Ofenoberfläche und die entsprechende Wandfläche abgebildet. Der Anteil der Fenster an der Gesamtfläche kam, entsprechend re-

duziert, ebenfalls bei der Abbildung der Wandfläche zum Ausdruck. Die Wand war eine 12 cm starke Ziegelwand mit einem Innenbelag aus 2 cm starkem Heraklith. Die elektrischen Werte des Ersatzbildes wurden unter Berücksichtigung der für zylindrische Abbildung bereits erhaltenen Reduktionsbeziehungen der Gleichungen (12) und (13) errechnet.

c) Ergebnisse

In der Fig. 15 ist das Ergebnis einiger Messungen dargestellt. Um den Einfluss des Baustoffes zu untersuchen, wurden Öfen gleicher Durchmesser einmal aus Sand und das andere Mal aus Eisen abgebildet (Fig. 15, links und rechts). Die Auswirkung einer kleinen, beziehungsweise grossen Speicher-

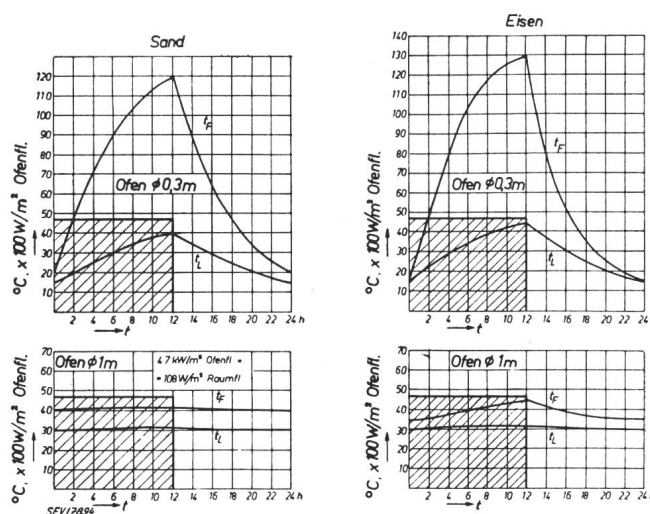


Fig. 15

Verlauf der Oberflächentemperatur t_F , der Raumlufttemperatur t_L und der erforderlichen Heizleistungen bei der Beheizung eines Raumes mit Speicheröfen verschiedenen Speichervermögens

Heizwärmeaufwand in Wh/m² Ofenfläche

masse auf die Temperaturdifferenz Δt_L ist für jeden der beiden Baustoffe aus dem oberen und dem darunter liegenden Diagramm zu erkennen. Sowohl der Sand- als auch der Eisenofen mit dem Durchmesser von 0,3 m ist für den untersuchten Raum (5 × 5 × 2,80 m) zu klein, denn die Temperaturdifferenz Δt_L schwankt zu stark. Infolge der guten Wärmeleitfähigkeit von Eisen ist die Oberflächentemperatur t_F unzulässig hoch, und es müsste dieser Ofen mit einem wärmedämmenden Aussenmantel umgeben werden. Die beiden Öfen mit dem Durchmesser von 1 m zeigen einen recht guten Verlauf der Temperaturdifferenz. Auch der keramische Ofen, der bloss etwa 40% der Wärmespeicherung des gleich grossen Eisenofens besitzt, erzeugt eine Temperaturverteilung, die als genügend gleichmässig bezeichnet werden kann.

Zu diesen Messungen ist zu sagen, dass sie lediglich die Mess- und Anwendungsmöglichkeiten des Modellverfahrens auch zur Bemessung und Gestaltung von Heizgeräten aufzeigen sollten.

5. Schlussbemerkung

Die Messungen mit dem elektrischen Modell sind erst im Beginn. Eine ganze Fülle von Aufgaben der

Wärmetechnik und anderer Gebiete ist noch offen und harret der Lösung. Während man bisher zur praktischen Klärung nur weniger Fälle der unterbrochenen Heizung Monate und Jahre benötigte, ausserdem bei verschiedenen Messungen fast nie gleiche Betriebs- und klimatische Bedingungen zugrunde legen konnte, ist es mit dem Modell möglich, diese Aufgaben in einem verschwindenden Bruchteil der Zeit unter stets gleichen Bedingungen abzuspielen und einwandfrei miteinander zu vergleichen.

Literatur

- [1] *Beuken, C. L.*: Wärmeverluste bei periodisch betriebenen Öfen, Dissertation; Freiberg/Sachsen, 1936.

- [2] *Fischer, W.*: Die elektrische Modellabbildung von Wärmeströmungsvorgängen und ihre messtechnische Ausnutzung. Elektrowärme Bd. 1939, Nr. 7, S. 133...142.

Adresse des Autors:

Dipl. Ing. R. Czepek, Hallstahammar, Schweden.

Berichtigung

«Fehlerbegrenzung der Durchgangsberechnung von Freileitungen» von K. Kohler, Karlsruhe (Bull. SEV Bd. 42 (1951), Nr. 9, S. 303...306). Wegen eines Missverständnisses in der Bezeichnung der Winkelfunktionen sind die Funktionen des Argumentes ψ durch die entsprechenden Hyperbelfunktionen zu ersetzen. An Stelle von $\sin \psi$, $\cos \psi$, $\operatorname{ctg} \psi$ muss es also immer $\sinh \psi$, $\cosh \psi$ und $\operatorname{ctgh} \psi$ heissen. Im weiteren sind die Arcus- durch Areafunktionen zu ersetzen.

Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

Die Supraleitfähigkeit

537.312.62

[Nach P. Grassmann: Erscheinungen und Anwendungen der Spureitfähigkeit. Z. VDI Bd. 92 (1950), Nr. 20, S. 554.]

Schon im Jahre 1911 wurde die Supraleitfähigkeit — die Eigenschaft einiger Materialien, z. B. Blei, Zinn, Quecksilber und verschiedener Halbleiter — bekannt, wonach diese Stoffe bei einer für jedes Material charakteristischen tiefen Temperatur, der sog. *Sprungtemperatur*, ihren Widerstand praktisch völlig verlieren.

Dieser Eigenschaft zufolge bleibt der in einem supraleitenden Stromkreis induzierte Strom, auch nach dem Aufhören jeglicher elektromotorischen Kraft, weiter bestehen. Selbst mit den empfindlichsten Verfahren liess sich dabei keine Ausnahme des Stromes nachweisen. Nach Angaben verschiedener Forscher ist die Leitfähigkeit von z. B. Blei unterhalb der Sprungtemperatur $1 \cdot 10^{-17} \Omega \text{mm}^2/\text{m}$. Die höchste Sprungtemperatur der bisher bekannten Supraleiter weisen Niobiumhydrid und Niobiumnitrid auf. Diese Stoffe verlieren die Supraleitfähigkeit schon zwischen -250 und -260°C . Die Sprungtemperatur von z. B. Quecksilber liegt bei -260°C , von Blei bei -266°C und von Zinn bei -270°C . Kupfer besitzt nicht die Eigenschaft der Supraleitfähigkeit, verhält sich demnach bei solchen tiefen Temperaturen gegenüber Supraleitern als Isolator.

In neuerer Zeit beginnt man die Supraleitfähigkeit praktisch auszunützen. Der Widerstand der Supraleiter ist oberhalb der Sprungtemperatur gut messbar; innerhalb eines Temperaturbereiches von nur wenigen Tausendstel Grad aber kann der Widerstand unmessbar kleine Werte annehmen. Diese Eigenschaft wird zum Nachweis geringer Wärmestrahlungen benützt, die mit andern Geräten nicht mehr erfasst werden könnten.

Die Supraleitfähigkeit kann ausser durch eine Temperaturerhöhung auch durch ein starkes Magnetfeld aufgehoben werden. Diese Eigenschaft wird neuerdings zu Steuerungszwecken benützt. Wird z. B. um einen supraleitenden Draht eine Spule gelegt, so kann durch das Magnetfeld des in der Spule fliessenden Stromes die Supraleitung im Draht entsprechend dem Spulenstrom unterbrochen und wieder hergestellt werden. Damit wird es möglich, einen wesentlich stärkeren Strom im Supraleiter durch einen schwachen Spulenstrom zu steuern.

Man kennt heute auch schon Schaltungen, die teilweise aus supraleitenden Kreisen aufgebaut die Erzeugung von langsamen elektrischen Schwingungen ermöglichen.

Als besonderen Vorteil derartiger Stromkreise darf man erwähnen, dass Störerscheinungen, die von der thermischen Bewegung der Elektronen herrühren und bei besonders hoher Verstärkung als Störgeräusche auftreten können, bei tiefen Temperaturen völlig unterdrückt werden. *Schi.*

Einsteins neue Untersuchungen

Von P. Jordan, Hamburg

530.12

[Aus Elektrotechn. Z. Bd. 71 (1950), Nr. 22, S. 615...618.]

Die in der Tagespresse verbreiteten Nachrichten über einen Vortrag, in welchem *Einstein* neue theoretische Gedanken entwickelt hat, welche er als geglücktes Endergebnis dreissigjähriger unausgesetzter Bemühungen bewertet, haben erneut die allgemeine Aufmerksamkeit auf diesen Denker gelenkt, welcher — trotz aller glänzenden Erfolge seiner Forschungsarbeit, und trotz aller Anerkennung auch äusserer Art, die ihm zuteil geworden ist — in seinem Schaffen doch weitgehend einsam geblieben ist.

Die in jenem Vortrag dargelegten Ideen sind inzwischen veröffentlicht worden als Anhang zur dritten Auflage seiner Schrift «The Meaning of Relativity». In wenigen Seiten ist hier der konzentrierte Ausdruck seiner Gedanken gegeben — in jener Konzentration, die eben nur in der mathematischen Formelsprache erreichbar ist; die aber andererseits natürlich auch die volle Kenntnis der Relativitätstheorie, der speziellen und der allgemeinen, voraussetzt.

Ein Versuch, in diesem Aufsatz zwar keineswegs eine Wiedergabe der neuen Einsteinschen Theorie zu unternehmen, wohl aber zu erläutern, um was es sich dabei eigentlich handelt, muss naturgemäss in erster Linie gerade auf das eingehen, was in der knappen Einsteinschen Abhandlung *nicht* gesagt, sondern als Vorkenntnis des dort gemeinten Lesers (also des trainierten Spezialisten der modernen theoretischen Physik) vorausgesetzt ist. Ich hoffe, dem Wunsche der Schriftleitung, ihren Lesern eine brauchbare Erläuterung der Sache vorzulegen, am besten zu entsprechen, wenn ich möglichst wenig auf den mathematischen Formelapparat eingehe, dafür aber um so genauer auf den Gedankeninhalt der Sache. Obwohl die Formeln unter Umständen den Vorteil haben, «imponierend» zu wirken, so ist ihre gehäufte Vorführung doch sachlich nutzlos, sofern nicht die Ausführung vollständiger fachwissenschaftlicher Formulierungen und Beweise unternommen wird — die aber schliesslich doch nur den Spezialisten reizen könnte.

Bekanntlich ist die Relativitätstheorie ein Gebäude in zwei Stockwerken: Die «spezielle» Relativitätstheorie hat sich in erster Linie aus Einsteins bahnbrechender Abhandlung von 1905 entwickelt; die «allgemeine» ist von Einstein 1915/16 begründet worden. Zunächst sei an die Hauptgedanken der speziellen Relativitätstheorie erinnert, obwohl diese den Freunden der Naturwissenschaft heute schon teilweise gut bekannt sind. Grundlegend sind zwei grosse Prinzipien — Zusammenfassungen von *Erfahrungstatsachen* — welche zunächst als unvereinbar miteinander scheinen: Das (spezielle) *Relativitätsprinzip* behauptet die Gleichwertigkeit aller Koordinatensysteme, die gegenüber dem «natürlichen» (praktisch durch den Fixsternhimmel gegebenen) Koordinatensystem in gleichförmig-geradliniger Bewegung sind. In einem nach aussen abgeschlossenen Raumschiff, das sich im