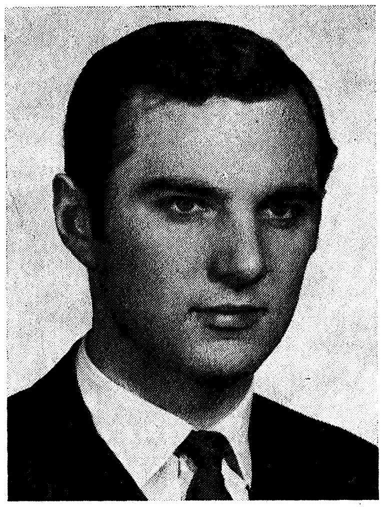
Berechnung des Filtrationsluftaustausches in Gebäuden

Von **A. Zöld**



Dr.-Ing. Dipl.-Math. András Zöld, Technische Universität Budapest, Institut für Baukonstruktion und technische Gebäudeausrüstung. II. Lehrstuhl für Heizung, Lüftung und Bauinstallation

Der Lüftungswärmebedarf stellt einen wesentlichen Anteil des Gesamtwärmebedarfs des Gebäudes dar. Seine Analyse ist im Falle von Gebäuden mit großer Ausdehnung und hoher Geschoßzahl von besonderer Wichtigkeit.

In der vorliegenden Arbeit werden die Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten eines raschen und wirksamen Berechnungsverfahrens des Filtrationsluftaustausches kurz dargelegt. Die Berechnungen zeigen, daß sich der Lüftungswärmebedarf von Geschoß zu Geschoß bedeutend ändert und daß bei der Heizflächenbestimmung eigentlich nicht von dem sogenannten Regelgeschoß ausgegangen werden sollte.

Problemstellung

Aus der großen Anzahl der Parameter folgt, daß die Berechnung des Filtrationsluftaustausches sehr kompliziert ist, da der Lüftungswärmebedarf von der Druckverteilung in der Umgebung des Gebäudes, der Fugendurchlässigkeit, der Außentemperatur, der normativen Innentemperatur und von der eventuell in einzelnen Räumen installierten künstlichen Be- und Entlüftung sowie den topologischen Beziehungen zwischen den Räumen des Gebäudes abhängt.

Nach Meinung des Verfassers besteht die Hauptschwierigkeit der Berechnung darin, daß das Gebäude ein komplexes aerodynamisches Objekt darstellt, in dem die Luft in verwickelten, schleifenförmigen, zusammengesetzten Stromkreisen strömt. Bei einer Berechnung mit guter Näherung sollten sämtliche Räume, alle äußeren und inneren Fenster, Türen, Lüftungskanäle im Gebäude sowie künstliche Außenluftzufuhren und Abluftabsaugungen in ihren Zusammenhängen und Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Eine derartige Berechnung läßt sich selbstverständlich nur mit Hilfe von Analogiemodellen oder von Digitalrechnern durchführen. Durch manuales Rechnen kann der Lüftungswärmebedarf nur annähernd — bei wesentlichen Vernachlässigungen — ermittelt werden. So ist beispielsweise nach DIN 4701 „Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden" die Berechnung mit zwei Kenngrößen und einem etwaigen Zuschlag vorzunehmen; dabei geht aus dem Ergebnis nicht hervor, in welchem Geschoß der untersuchte Raum liegt.

Das Näherungsverfahren ist selbstverständlich unentbehrlich, da ja die rechentechnische Projektierung eines jeden Gebäudes noch geraume Zeit lang irreal ist. Als aktuell darf hingegen die Forderung gelten, daß einerseits nach einem rechentechnischen Verfahren mit guter Näherung für die Entwurfspraxis ausführlichere und genauere Bemessungsgrundlagen ausgearbeitet werden, andererseits für umfangreiche Gebäude von besonderer Wichtigkeit eine konkrete, rechentechnische Bemessung ermöglicht wird.

Bei der Behandlung des Verfahrens zur Berechnung des Filtrationsluftaustausches wird vorausgesetzt, daß

— die Druckverteilung um das Gebäude aus den aerodynamischen Koeffizienten oder Modellversuchen sowie aus der Berechnung des Schwerkraftauftriebs bekannt ist;

— die Durchlässigkeitsfaktoren oder Kennlinien der Fugen,

— die hydraulischen Kennlinien der Lüftungskanäle und

— die Kennlinien oder Luftmengen der Be- und Entlüftungsanlagen gegeben sind.

Außerdem wird ein projektiertes Gebäude als gegeben vorausgesetzt, von dem die erforderlichen geometrischen Daten sowie Angaben über sämtliche äußere und innere Türen und Fenster, Lüftungskanäle und die normativen Innentemperaturen vorliegen.

An das Berechnungsverfahren werden folgende inhaltliche Forderungen gestellt:

1. In der Annahme von stationären Verhältnissen soll sich das Berechnungsverfahren auf das gesamte Gebäude als zusammenhängendes aerodynamisches Objekt beziehen und sämtliche Zusammenhänge und Wechselwirkungen berücksichtigen.
2. In Kenntnis der Strömungswiderstandsgesetze der Fugen und Lüftungskanäle soll der Strömungswiderstand in Abhängigkeit von dem Luftmassenstrom nach den Gesetzmäßigkeiten der laminaren bzw. turbulenten Strömung berechnet werden.
3. Das Verfahren soll sich auch für die Berechnung der Wirkung der unter Umständen in einzelnen Räumen installierten künstlichen Be- und Entlüftung eignen.
4. Als Endergebnis soll für alle Räume die Massenbilanz der Luftmassenströmung „nach Quelle und Ziel" zur Verfügung stehen.

Weitere Forderungen an das Verfahren:
1. Von dem Entwurfsbearbeiter einfach zusammenstellbarer „input" und leicht auswertbarer „output";
2. hohe Arbeitsgeschwindigkeit;
3. ausreichende Speicherkapazität von Rechenanlagen mittlerer Größe auch zur Berechnung von mehreren hundert Räumen und aller möglicher Verbindungen;
4. eine beliebig hohe Genauigkeit bis zur im gegebenen Falle vernünftigen Grenze.

Darunter ist zu verstehen, daß das Verfahren zu einem im Prinzip „genauen" Ergebnis führen und rasch gegen dieses konvergieren soll. Die Bestimmung des „genauen" Ergebnisses hat jedoch oft keinen Sinn; der zulässige Rechenfehler wird nach der Genauigkeit der Angaben über die Druckverteilung in der Gebäudeumgebung, nach der Streuung der Fugendurchlässigkeiten und unter Berücksichtigung der praktischen Ansprüche vorgeschrieben.

Grundlagen des Verfahrens

Im wesentlichen wurde das Verfahren in Anlehnung an die Theorie der Netzströme erarbeitet. Das Netzwerk ist in diesem Sinne ein Graph; zu allen Ecken desselben werden eine oder mehrere z-Größen und zu allen Kanten desselben eine oder mehrere w-Größen zugeordnet. Je nach Art der Aufgabe kann die Bedeutung dieser Zahlen verschieden sein. Die den Ecken zugeordneten Zahlenwerte können z. B. Intensitäten, Potentiale und die den Kanten zugeordneten Zahlen Kapazitäten, Leitzahlen, Transportkosten usw. ausdrücken. In einer konkreten Aufgabe haben diese eine konkrete Bedeutung und Dimension und ihre Beziehungen zueinander werden durch bekannte Zusammenhänge bzw. Funktionen bestimmt. Es sollen lediglich zwei grundlegende Quellenwerke [1; 2] über die Netzströme genannt werden; auf die Mannigfaltigkeit der Anwendungsmöglichkeiten sei nur hingewiesen.

Im weiteren werden einige elementare Eigenschaften der Graphen und Netzwerke kurz betrachtet, deren Kenntnis für die Behandlung der gegenseitigen Übereinstimmung von Graphen und Gebäude bzw. von Netzströmen und der Luftströmung im Gebäude unerläßlich ist:

1. Der **Graph** ist ein Komplex aus der nicht leeren Menge N und der Menge A, wo zu jedem Element A gewisse Elemente x_i und x_j der Menge N zugeordnet sind. Die Elemente der Menge N sind die Ecken des Graphs, die Elemente der Menge A die Kanten des Graphs. In üblicher Weise werden die Kanten durch (x_i, x_j) oder (i, j) bezeichnet, wobei x_i und x_j die durch die Kanten verbundenen beiden Ecken sind. Die Ecke wird durch x_j oder kurz durch j bezeichnet.

2. Als **Weg** wird eine Reihe $x_0, x_1, \ldots x_m$ der Ecken bezeichnet, wo im Falle von jedem $i = 1, 2, \ldots m$ (x_{i-1}, x_i) die Elemente der Menge A sind, die mit Symbol $\in$ ausgedrückt wird: $(x_{i-1}, x_i) \in A$.

3. Der **Zyklus** ist ein aus endlich vielen Kanten bestehender Weg, dessen Anfangs- und Endpunkt sich decken.

4. Es sei R eine **Teilmenge** der Menge N. Die Kanten (x_i, x_j) sind

— in R einlaufend, wenn $x_j \in R$, $x_i \bar{\in} R$;

— aus R ausgehend, wenn $x_i \in R$, $x_j \bar{\in} R$,

wobei $\bar{\in}$ die Verneinung von $\in$ bedeutet.

Im weiteren sollen noch folgende Bezeichnungen angewandt werden: A_R^- sei die Menge der in R einlaufenden Kanten und A_R^+ die Menge der von R ausgehenden Kanten.

5. Als **Netzwerk** wird ein Graph bezeichnet, wobei allen Ecken desselben eine oder mehrere z_i^k und allen Kanten desselben eine oder mehrere $w_{i,j}^k$ Zahlen zugeordnet werden. Der Inhalt dieser Zahlen kann je nach Art der Aufgabe sehr verschieden sein. Die Netzwerke werden in der üblichen Weise durch $[N, A, k \ldots]$ bezeichnet, wobei N die Menge der Ecken, A die Menge der Kanten, k (und die etwaigen weiteren Bezeichnungen) die den Kanten bzw. Ecken zugeordneten Zahlen bedeuten.

Im Netzwerk fließt $f_{i,j}$ Strom, wenn

$$\sum_i f_{i,j} - \sum_i f_{j,i} = d_i,$$

und hierin

d_i die Intensität der Ecke i ist.

Bei dieser Bezeichnung ist dann die Ecke i für den Strom f

— Quelle, wenn $d_i > 0$;

— Senke, wenn $d_i < 0$;

— neutral, wenn $d_i = 0$.

Übereinstimmung des mathematischen Problems mit der praktischen Aufgabe

Aus mathematischer Sicht besteht die Aufgabe in der Bestimmung eines — in gewissem Sinne „optimalen" — Stromes, durch den die auf dem Strom interpretierte Zielfunktion minimalisiert wird. Ist z. B. der Graph $[N, A]$ mit den den Ecken zugeordneten Intensitäten d_i, den Strömen f_{ij} und den den Kanten zugeordneten sogenannten Kostenfunktionen $c_{i,j}(f_{i,j})$ gegeben und ist die Bedingung der Existenz des Stromes

$$\sum_{j \in A_i^+} f_{ij} - \sum_{j \in A_i^-} f_{ij} = d_i, \quad i \in N$$

erfüllt, dann besteht die Aufgabe in der Bestimmung eines „optimalen" Stromes $f_{i,j}$ durch den die Zielfunktion

$$\sum_{i,j} c_{ij}(f_{ij})$$

minimalisiert wird.

Der Kreis der untersuchten Aufgaben soll auf die Fälle beschränkt werden, wo die Zielfunktion konvex ist. Das stimmt mit den zu behandelnden praktischen Problemen auch hinsichtlich der physikalischen Erscheinung überein. Ohne Beweisführung wird festgestellt, daß die hinreichende und notwendige Bedingung der Existenz eines optimalen Stromes darin besteht, daß für jede Ecke $i \in N$ ein Potential bestehe, bei dem

$$P_j - P_i \leqq c_{ij}^+(f_{ij}),$$

wenn $f_{ij} = 0$ ist,

$$c_{ij}^-(f_{ij}) \leqq P_j - P_i \leqq c_{ij}^+(f_{ij}),$$

wenn $f_{ij} > 0$ ist.

c^- ist die linksseitige, c^+ die rechtsseitige Ableitung der Funktion.

Ist $c_{ij}^+(f_{ij}) = c_{ij}^-(f_{ij})$, kann statt der zweiten Beziehung geschrieben werden:

$$P_i - P_j = c'_{ij}(f_{ij}),$$

wenn $f_{ij} > 0$ ist.

Bei der Lösung einer praktischen Aufgabe wird das Gebäude durch einen Graphen dargestellt, wobei den Ecken des Graphen die Räume des Gebäudes sowie gewisse diskrete Punkte der Gebäudeumgebung (in der Höhe der Mittellinie der Außenfenster, Ausmündungen von Lüftungskanälen usw.) entsprechen und durch die Kanten die Türen, Fenster und Lüftungskanäle dargestellt werden. Die für die Kanten des Netzwerks angegebenen Funktionen beschreiben die hydraulischen Widerstandsgesetze der Türen, Fenster und Lüftungskanäle.

In physikalischem Sinne ist das Problem im wesentlichen ein für das genannte Netz interpretiertes, stationäres Transportproblem, für das folgende drei Gesetze gelten:

1. Das Kirchhoffsche erste „Knotenpunktgesetz", das die für eine beliebige Ecke des Netzwerks gültige Kontinuitätsbedingung ausdrückt:

$$\sum_j f_{ij} - \sum_j f_{ji} = d_i.$$
$$i = 1, 2, \ldots n$$
$$f_{ij} \geqq 0$$
$$(i, j) \in A$$

Unter stationären Verhältnissen ist die Differenz der in die Ecke einlaufenden und von dort ausgehenden Ströme gleich der Intensität der Ecke.

2. Das Kirchhoffsche zweite „Schleifengesetz", das im wesentlichen für einen beliebigen Zyklus des Netzwerkes das Gesetz der Erhaltung der Energie aussagt, oder — was gleichbedeutend ist — die Gleichheit des durch Generatoren erzeugten Potentialunterschieds und des Potentialabfalls auf den Kanten in einem Zyklus zum Ausdruck bringt.

Der Zyklus sei durch μ bezeichnet. Dann gilt:

$$\sum_{(i,j) \in A_\mu^+} E_{ij} - \sum_{(i,j) \in A_\mu^-} E_{ij} = 0,$$

wobei

$$E_{ij} = P_i - P_j,$$

A_μ^+ und A_μ^- die Mengen der dem Umlauf des Zyklus gleichgerichteten bzw. ungleichgerichteten Kanten bedeuten.

3. Das Widerstandsgesetz, das die Beziehung zwischen Potentialunterschied und Stromwert ausdrückt. Seine allgemeine Form lautet

$$P_i - P_j = R_{ij}(f_{ij}).$$

Hierin ist R_{ij} die Widerstandsfunktion, wobei der sogenannte Widerstandsfaktor auch von dem Potential und dem Strom abhängig sein kann: $R_{ij} = R_{ij}(f_{ij}, P_i, P_j)$.

Die Übereinstimmung des Transportproblems mit dem beschriebenen mathematischen Problem ist wie folgt: Dem Stromwert in der mathematischen Aufgabe entspricht der Luftmassenstrom, den Potentialen der Luftdruck. Den Ableitungen der Kostenfunktionen

$$c_{ij}(f_{ij})$$

entsprechen die Widerstandsfunktionen

$$c'_{ij}(f_{ij}) = R_{ij}(f_{ij}).$$

Daraus ergibt sich

$$\sum c_{ij} f_{ij} = \sum \int R_{ij}(f_{ij})\, \mathrm{d}f,$$

und durch den „optimalen" Strom wird die Zielfunktion

$$\sum \int R_{ij}(x)\, \mathrm{d}x$$

minimalisiert.

Die Ermittlung des „optimalen" Stromes bedeutet in diesem Fall eigentlich die Bestimmung des den drei Gesetzen entsprechenden Gleichgewichtszustands.

Dieser Gleichgewichtszustand ist in dem anschaulichen Sinne „optimal", da zu ihm das Minimum der durch die strömenden Mengen auf die Überwindung der Widerstände aufgewandten (sog. Dissipations-) Arbeit (das Minimum der Zielfunktion) gehört. Die Konvexität der Zielfunktion ist auch auf der Grundlage einer physikalischen Betrachtungsweise einzusehen, da ja der Widerstand mit zunehmendem Stromwert streng monoton zunimmt. Der Zusammenhang zwischen der

Druckdifferenz und dem Luftmassenstrom läßt sich wie folgt beschreiben:

$$P_i - P_j = k'_{ij}(f_{ij}),$$

wenn $f_{ij} < f^*_{ij}$

$$P_i - P_j = k''_{ij}(f_{ij})^n,$$

wenn $f_{ij} \geqq f^*_{ij}$

und

$$k'_{ij}(f^*_{ij}) = k''_{ij}(f^*_{ij})^n.$$

In Verbindung mit den praktischen Fällen drücken diese Beziehungen die Widerstände bei laminarer bzw. turbulenter Strömung aus. Der Stromwert f^*_{ij} bedeutet den Grenzwert des Luftmassenstromes für je eine konkrete Öffnung (Tür oder Fensterfugen) bzw. für Lüftungskanäle, wo die laminare Strömung in eine turbulente Strömung übergeht.

Lösung der Aufgabe

Unter Berücksichtigung der für die Berechnung zur Verfügung stehenden Ausgangsdaten und der gesuchten Rechenwerte stellt die Aufgabe im wesentlichen ein Dirichlet-Neumannsches Problem dar. Die Menge N der Ecken des die Räume des Gebäudes und gewisser hervorgehobener Punkte seiner Umgebung darstellenden Graphen ist auf zwei disjunktive Teile partitioniert: Für einen Teil der Ecken (die hervorgehobenen Punkte der Umgebung), für die Teilmenge N', sind die Potential-, d. h. die Luftdruckwerte gegeben und die Intensitäten zu berechnen; für den anderen Teil der Ecken (für die die Räume darstellenden Graphenecken) sind die Intensitätswerte festgelegt (in der Regel gleich Null oder bei etwaiger künstlicher Be- und Entlüftung dem fixen Luftmassenstrom entsprechend), während die Potential- d. h. die Luftdruckwerte für Teilmenge N'' „frei" sind. Den vorigen Ausführungen gemäß ist der optimale Strom, d. h. der den Gleichgewichtsbedingungen, den Kirchhoffschen Gesetzen und dem Widerstandgesetz entsprechende Luftmassenstrom zu berechnen.

So erhält man die gesuchten Werte, d. h. die Bilanz der Luftmassenströmung nach „Quelle und Ziel" für jeden einzelnen Raum. Damit läßt sich in Kenntnis der Außentemperatur und der Lufttemperatur in den Nachbarräumen der Lüftungswärmebedarf berechnen.

Das Berechnungsverfahren ist auf die Dualgradientenmethode [3] gegründet; der Aufbau des Algorithmus wird im weiteren kurz zusammengefaßt:

Ausgegangen wird von einer beliebig angesetzten Potentialverteilung $P_0(x_i)$, $x_i \in N''$, $P_0(x_j) = P(x_j)$, $x_j \in N'$. Die Praxis lehrt, daß es am zweckmäßigsten ist, vom Ansatz von $P_0(x_i) = 0$, $x_i \in N''$ auszugehen, da die Konvergenz so rasch ist, daß sich durch die Substitution einer geschätzten oder auf der Berechnung von Anhaltswerten fußenden Ausgangspotentialverteilung praktisch keine Maschinenzeit einsparen läßt.

Aus der Ausgangspotentialverteilung werden anhand des Optimumkriteriums die Ausgangsstromwerte:

$$P_0(x_i) - P_0(x_j) = R_{ij}(f_0(x_i, x_j)),$$

der Überrest

$$D_{f0}(x_i) = \sum_j f_0(x_i, x_j) - \sum_j f_0(x_j, x_i),$$

und der Unterschied

$$h_0(x_i) = D_{f0}(x_i) - d(x_i),$$

wobei $d(x_i)$ die auf die Ecke x_i bezogene Intensität bedeutet.

Dann wird die Potentialverteilung folgendermaßen geändert:

$$P_1(x_i) = P_0(x_i) - h_0(x_i)\gamma_0 c_0 x_i \in N.$$

Im Ausdruck sind γ_k und c_k sogenannte Normalisierfaktoren, die so zu wählen sind, daß folgende Bedingungen erfüllt werden:

$$\Sigma\gamma_k = +\infty \qquad k = 0,1,2,\ldots$$

$$\Sigma\gamma_k^2 < +\infty$$

$$c_k \|h_k\| \leqq C.$$

Hierin bedeutet $\|h_k\|$ die Norm des Unterschiedes h und C eine positive Konstante.

Der allgemeine Schritt ist:

$$h_k(x_i) = D_{fk}(x_i) - d(x_i)$$

$$P_{k+1}(x_i) = P_k(x_i) - h_k(x_i)\gamma_k \varrho_k$$

Es läßt sich beweisen, daß

$$\lim_{k\to\infty} f_k(x_i, x_j) = F(x_i, x_j)(x_i, x_j) \in A$$

ist. Das heißt, die nach diesem Verfahren gewonnenen Stromwerte streben mit zunehmendem k den optimalen, also den einem Gleichgewichtszustand entsprechenden Stromwerten zu.

Bei der Lösung praktischer Aufgaben ist es zweckmäßig, den Rechenprozeß bei einer Relativfehlergrenze mit Hilfe von nach je einer gewissen Anzahl von Schritten durchgeführten Überprüfungen zu unterbrechen.

Das Rechenprogramm wurde zuerst in der Maschinensprache FORTRAN IV ausgearbeitet. Erwähnenswert ist, daß die Durchrechnung eines zehngeschossigen Typen-Wohngebäudes mit 320 Räumen etwa vier Minuten erforderte. Die Rechenergebnisse zeigten in guter Übereinstimmung mit den praktischen Erfahrungen, daß sich der Lüftungswärmebedarf in Abhängigkeit von den Geschossen stark verändert, und daher das Gebäude hinsichtlich der Heizflächenanordnung eigentlich kein Regelgeschoß hat: die Heizflächen ändern sich von Geschoß zu Geschoß.

Allgemeine Bemerkungen

Mit Hilfe der Theorie der Netzströme lassen sich zahlreiche Bemessungsprobleme der Bauphysik und der Heizungs- und Lüftungstechnik rasch und genau lösen. Die Methode wurde für die Berechnung mehrdimensionaler Temperaturfelder sowie für die Ermittlung des stationären Wärmegleichgewichts von Gebäuden mit potentialabhängigen (u. U. mit temperaturabhängigen) Wärmeleitbzw. Wärmeübertragungszahlen angewandt [4].

Die vielseitige Anwendbarkeit wird dadurch gekennzeichnet, daß auf derselben Grundlage ein Programm für die Bemessung und Kostenoptimierung von Fernheizungsnetzen ausgearbeitet wurde[1]). Das Verfahren ist selbstverständlich auch für die Bemessung von Lüftungskanal-, Gas- und Wasserleitungsnetzen geeignet, unabhängig von der Anzahl der Stromkreise und Schleifen im Netz.

Schlußfolgerungen

Auf den Gebieten der Bauphysik, der Heizungs- und Lüftungstechnik werden häufig Aufgaben gestellt, bei denen in der Annahme stationärer Verhältnisse ein Energie- oder Massentransportproblem gelöst, also der Gleichgewichtszustand ermittelt werden muß. Oft ist das untersuchte Objekt selbst im ursprünglichen Sinne des Wortes ein Netz, jedoch lassen sich auch beliebige Objekte (z. B. ein Gebäude mit seinen Innenräumen) durch Graphen darstellen. In Kenntnis der Leitungs- bzw. Widerstandsgesetze kann mit Hilfe des in Anlehnung an die Theorie der Netzströme ausgearbeiteten Algorithmus das Transportproblem auch für ausgedehnte und verwickelte Objekte rasch und mit der gewünschten Genauigkeit gelöst werden.

Von den praktischen Transportproblemen wurde in der vorliegenden Arbeit die Berechnung des Filtrationsluftaustausches beschrieben. Durch die Erhöhung der Geschoßzahlen erhält diese Aufgabe eine große Bedeutung für die Bestimmung des Lüftungswärmebedarfs in jedem Gebäude, für das keine örtliche Raumtemperaturregelung vorgesehen ist. Die Berechnungen zeigen, daß sich der Lüftungswärmebedarf von Geschoß zu Geschoß bedeutend ändert und bei der Heizflächenbestimmung eigentlich nicht von dem sogenannten Regelgeschoß ausgegangen werden darf.

Schrifttum

[1] *Ford, L. R.*, und *D. R. Fulkerson:* Flow in Networks, Princeton University Press, 1962

[2] *Klafszky, E.:* Hálózati folyamatok. Bólyai Társulat, Budapest, 1969.

[3] *Ermoljew, Ju. M.*, und *I. M. Melnik:* Ekstremalnye zadatschi na grafach. Naukowa Dumka, Kiew, 1968

[4] *Zöld, A.*, und *I. Palócz:* Primenenie metodow transportnych zadatsch, Periodica Polytechnica (R).

[H 208]

DK 697.12:628.854.3

[1]) Dipl.-Math. *I. Palócz*, wissenschaftlicher Mitarbeiter, Landesplanungsamt
Dipl.-Ing. *M. Palócz*, Assistent am Lehrstuhl für Heizung, Lüftung und Bauinstallation II, TU Budapest