

Simulieren Optimieren Auslegen

Energie- und Kostenbilanzen aus dem Computer

Guido von Thun, Diplomingenieur aus Nürnberg, DGS, übersandte uns „nur“ drei Arbeitsberichte aus seiner „Computerei“ als wir die Absicht laut werden ließen, redaktionell das Thema „Rechnergestützte Energie- und Bauberechnungsverfahren“ in der SONNENERGIE abzuhandeln.

Jeder einzelne Bericht für sich allein würde bereits den möglichen Rahmen sprengen. Speicherfähigkeit und Schnelligkeit moderner Rechenanlagen gestatten nicht nur die Verarbeitung einer fast beliebigen Anzahl von Daten, sie sind auch in der Lage mit dieser Datenfülle in annehmbarer Zeit alle Alternativen durchzuprüfen, die für ein Bauprojekt überhaupt sinnvoll erscheinen.

Daher sind diese Arbeitsberichte trotz knappster Textverwendung durch die große Zahl von Informationen zu umfangreich, um sie in einer Zeitschrift vollständig zu drucken. Wir haben uns daher entschlossen, aus diesen drei Berichten nur Arbeitsprinzipien, Aufgabenstellungen und typische Alternativen für Lösungen darzustellen.

Zur Einführung:

Jeder Heizungsfachmann, jeder Architekt kennt aus der alten DIN 4701 die Formel

$$Q = k F (t_i - t_a) z$$

Q = Wärmemenge, k = Wärmedurchgangszahl, F = wärmetauschende Fläche, t_i = Innen-, Soll- oder Raumtemperatur, t_a = Außentemperatur und z = Zeit.

Mit dieser Formel kann man nur „Momentaufnahmen“ machen, stationär einen – nach den gewählten Werten – augenblicklichen Zustand beschreiben.

Der k-Wert hat darin eine zentrale Bedeutung, er soll eine große Zahl von wirksamen Parametern zusammenfassen, wird praktisch aber nur – z. B. nach Jürges bei Luft – aus den Wärmeübergangszahlen bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten und den Materialwerten für die Wärmeleitung bestimmt. Strahlungswärmeübergang, Konvektion, Speicherfähigkeit des Materials usw. werden darin gar nicht erfaßt. Selbst viele „Momentaufnahmen“ dieser Art können daher die wirklichen Energieflüsse nicht beschreiben, man „korrigierte mit Erfahrungszuschlägen“.

Die Folge – fast alle alten Heizungsanlagen wurden überdimensioniert gebaut, nach dem Motto: „Lieber ein bißchen mehr, das ist sicherer“ – wegen 14 Tagen Extremlage im Jahr liefen die meisten Heizungen den ganzen übrigen Teil des Jahres mit schlechten und schlechtesten Wirkungsgraden.

Seitdem uns das Energiesparen nun sogar gesetzlich verordnet wurde, mußten andere Wege gefunden werden, die die Energieflüsse an, in und um unsere Gebäude nicht mehr stationär beschreiben, sondern die Dynamik erfaßbar machen, die Art und den Grad der Veränderungen über das Jahr darstellen.

Wie diese Aufgabe zu lösen ist, beschreibt Guido von Thun in:

Beispiel 1:

Berechnung der Energiebilanz einer Solarfassade für eine Lagerhalle:

Die Aufgabe:

Für eine Lagerhalle soll die Einsatzmöglichkeit einer „Solarfassade“ untersucht werden. Weiterhin sollen Vorschläge für die Einsparung von Brennstoff erarbeitet werden und schließlich sind die zu erwartenden Betriebskosten zu ermitteln. Die Temperatur der Halle darf 5–6° C nicht unterschreiten. Es ist eine direktbefeuerte Luftheizung mit 105 kW Heizleistung installiert.

Als Solarfassade sind vor der Außenwand angebrachte Absorberbleche mit einer vorgesetzten Plexiglas-scheibe vorgesehen. Der Wärmege-winn aus dieser Anordnung (ähnlich der „Trombe-Wand“) soll 3facher Natur sein:

1. aktiver Wärmege-winn durch Erwärmung des Luftstromes, der an den Platinen vorbeistreicht, der im Winter zur Heizung in das Gebäude geleitet wird oder zur Lüftung der Halle über das Dach abgeleitet wird.

2. die rückseitige Abstrahlung der sonnenerwärmten Absorberbleche soll die dahinterliegende Betonwand der Halle erwärmen.

3. die konstruktionsbedingten Luftschichten der Solarfassade (2 x 5 cm) dienen als „Dämmung“ gegen Wärmeverluste während der Nacht. Durch die Verwendung selektiver Absorberbleche ($\alpha = 0,91$, $\epsilon = 0,16$) werden zusätzlich die Abstrahlungsverluste reduziert.

Wände und Dach der Lagerhalle bestehen aus 12 bzw. 16 cm starken Stahlbetonfertigmauerplatten. Fensteröffnungen aus Profilglas sind vernachlässigbar – bezogen auf den Wärmege-winn aus Sonneneinstrahlung –, da die Fenster an der Nordost-Seite des Gebäudes liegen.

Lösungsmethode:

Um die instationären thermodynamischen Vorgänge bei dieser Aufgabe zu berücksichtigen, wurde das

Rechenprogramm **BLAST** (Building Loads Analysis Systems Thermodynamics) angewandt. Folgende Berechnungsmethode liegt dem Programm zugrunde:

Heizlast-Berechnungs-Methode:

Um die Heiz- und Kühllasten zu ermitteln, wurde die „Thermal Balance Technique“ verwendet. Dabei wird der thermische Beharrungszustand für jede Fläche in und um den Raum ermittelt, daraus werden dann die Oberflächen- und Raumlufttemperaturen bestimmt.

Der Wärmeverlust einer Fläche durch Wärmeübertragung zwischen Raumluft und Oberfläche, der Erwärmung aus Strahlung von den übrigen Flächen, der Erwärmung aus Sonneneinstrahlung (durch Fenster oder durch Wände übertragen) sowie auch der Wärmeabstrahlung von Geräten und Personal innerhalb des Raumes.

Die Lasten werden also einfach dadurch ermittelt, daß die Temperaturen mit denen, die durch ein Heizungs-, Lüftungs- und Klimatisierungssystem eingebracht werden, ins Verhältnis gesetzt werden.

Wärmege-winn aus Sonneneinstrahlung:

Für jede Stunde des Tages wird aus der Stellung der Sonne die Einstrahlung berechnet. Das Sonnenazimut und die Breite werden verwendet, um festzustellen, welche Flächen der Bestrahlung ausgesetzt oder beschattet sind und wieviel Sonnenstrahlung durch die Fenster direkt in den Raum eindringt. Der Einstrahlungswinkel auf die Wände und das Dach wird benötigt, um den Anteil der an der Oberfläche reflektierten und der in das Gebäude hinein übertragenen Energie zu ermitteln. Der Einstrahlungswinkel wird ebenfalls benutzt, um die Effekte schattenwerfender Flächen, die am Gebäude angebracht sein können, aber auch freistehende Bäume, andere Gebäude etc. zu berücksichtigen.

Die Sonnenstrahlung wird, als Funktion der Bewölkung in eine direkte und eine diffuse Komponente zerlegt. Eine Schneedecke verstärkt den Anteil der reflektierten Strahlung, regnerisches Wetter bewirkt eine Verschiebung des Taupunktes. Jedesmal wird ein neuer Rechendurchlauf vorgenommen, wenn die Sonnenhöhe sich in ihrem Höchststand um 4° ändert. Diese geschieht etwa 14mal im Jahr. **Der Berechnungsdurchlauf wird für jede Stunde und jeden Tag des betrachteten Zeitraumes durchgeführt.**

Ausgehend von der Beschaffenheit der äußeren Oberflächen und ihren physikalischen Eigenschaften wie z. B. Rauhigkeit, Absorptions- und Reflektionsvermögen wird eine Nettomenge Sonneneinstrahlung absorbiert und dadurch die Wände er-

wärmt. Ein Teil davon wird wieder reflektiert oder geht durch Einwirkung des Windes an der Außenoberfläche wieder verloren. Es bleibt jedoch ein Rest, der durch die Wände in das Innere eindringt.

Wärmeverluste durch Wärmeleitung:

Es ist möglich die Lasten genau zu ermitteln, wenn man Methoden der Response-Faktoren anwendet wie z. B. die Wärmeübertragungsfunktion, die im ASHRAE Algorithmus verwendet wird. Dieser wurde aus der allgemeinen Wärmestromgleichung für dreidimensionalen Wärmestrom von J. B. J. Fourier hergeleitet.

$$\frac{\partial \delta}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c \rho} \left(\frac{\partial^2 \delta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \delta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \delta}{\partial z^2} \right)$$

Die analytische Lösung der Differentialgleichung ist im allgemeinen sehr aufwendig. Auf Rechenanlagen wird dies durch schrittweise Integration in beliebig kleinen Schritten (Basis hier = eine Stunde) durchgeführt. Hier kann man sich jedoch auf die Betrachtung des eindimensionalen Wärmestroms beschränken. Bei Körpern, bei denen die eine Ausdehnungsrichtung sehr klein gegenüber der anderen ist (z. B. an Platten, Wänden), erhält man auch damit eine ausreichend genaue Lösung. Durch die Anwendung dieser Methode kann die von der Innenseite einer Wand nach außen transportierte Wärme unter Berücksichtigung des Zeitverhaltens quantifiziert werden. Dadurch wird auch die Speichereigenschaft von Wänden mit berücksichtigt. Die genannten Grundlagen werden im Rechenprogramm **BLAST** folgendermaßen zum Ansatz gebracht:

Die instationären thermodynamischen Vorgänge werden durch schrittweise Integration erfaßt. Der gewählte Zeitschritt ist eine Stunde, damit erhält man eine zulässige Vereinfachung.

Um die Wand-Oberflächentemperatur auf der Innenseite einer Wand zu ermitteln, wird zuerst die äußere Oberflächentemperatur bestimmt. Sie ist eine Funktion folgender Variablen:

- direkte Sonneneinstrahlung
- Außenlufttemperatur, Windrichtung und Geschwindigkeit für den konvektiven Wärmeübergang
- Rückstrahlungsverluste von der äußeren Oberfläche in den Himmel
- Wärmeleitung von der Innenwand-Oberfläche

Dabei muß berücksichtigt werden, daß zwischen den Oberflächentemperaturen innen und außen eine Rückkopplung besteht. **BLAST** vereinfacht diese umfangreichen Integrationsrechnungen durch „Entkopplern“ der Temperaturen. Es wird dabei angenommen, daß die Oberflächentemperatur der Innenwand weit-

gehend konstant ist. Verwendet wird die innere Wand-Oberflächentemperatur der vorangegangenen Stunde, um die Wärmeverluste aus der Wärmeleitung nach außen zu berücksichtigen.

Die Alternativen

Für vier Alternativen wurden die Ergebnisse berechnet:

1. bestehende Halle
2. bestehende Halle mit je 115 m² Solarfassade, angeordnet an der Südost- und Südwestwand
3. eine 40 mm Dämmung aus Polystyrol-Hartschaum mit Putz für die gesamte Halle (Version 1 – mit Dämmung)
4. Die gedämmte Halle wird mit einer Solarfassade versehen; die Flächen unter den Absorbieren werden jedoch nicht gedämmt.

Die **Ganzjahres-Simulation** wurde mit den Wetterdaten von Grafenwöhr von 1967 durchgeführt. Die Ergebnisse können mit diesen Daten als repräsentativ angesehen werden. Die Heizung im Gebäude ist vom 1. Nov. bis zum 15. März in Betrieb.

bäudes zu berücksichtigen wurden insgesamt sieben aufeinanderfolgende Tage durchgerechnet. Die Werte des letzten Tages sind in Computer-Diagrammen dargestellt.

– Da diese Computer-Diagramme drucktechnisch nur in ungenügender Qualität reproduzierbar sind, wird hier auf die Wiedergabe verzichtet. –

Unter den vorgegebenen Bedingungen ergeben sich folgende Verbrauchswerte:

Es ergibt sich als Zusammenfassung:

Im vorliegenden Fall ist es nicht angebracht eine Solarfassade vorzuhängen. Während der Zeiten mit hoher Einstrahlung – Frühling bis Anfang Herbst – wird keine Energie benötigt. Andererseits wäre der durch passive Nutzung gewonnene Anteil an Energie geringer als die Energieverluste einer einfachen Dämmung.

Aus Gründen der Kosteneffizienz wird daher empfohlen auf die Anbringung einer Solarfassade zu verzichten.

Die wichtigsten Werte aus der Jahressimulation sind in der Tabelle zusammengefaßt:

Bestehende Halle	max. erf. Heizleistung aus Transmission kW	Jahresenergiebedarf aus Transmission MWh	Raumtemperatur °C	
			max.	min.
Alternative 1	102,80	72,14	32,9	1,88*
Alternative 2	97,78	68,72	32,7	2,16*
Alternative 3	25,98	34,41	25,5	4,00
Alternative 4	27,93	37,70	26,2	3,95

* Diese Wert ergeben sich durch die Tatsache, daß die Wetterdaten nach dem 15. März noch einige kühle Tage enthalten. Da die Heizung dann nicht mehr eingeschaltet ist, wird sich diese Temperatur einstellen. Aus der Tabelle werden folgende Schlüsse gezogen:

1. Wird die Solarfassade am bestehenden Gebäude angebracht, erzielt man Einsparungen, wenn auch nur geringfügig.

2. Eine Solarfassade an einem gedämmten Gebäude bewirkt dagegen zusätzliche Wärmeverluste.

Offensichtlich ist die verfügbare Sonnenstrahlung von November bis Mitte März so gering, daß ihre passive Nutzung weniger bringt als die Dämmung des Gebäudes. Dies nicht zuletzt auch wegen der kurzen Sonnenscheindauer.

Um eine höhere Transparenz der Ergebnisse zu erhalten, wurden stündliche Ergebnisse für einen sonnigen Tag mit maximaler 10,1 °C und minimaler -2,8 °C Außentemperatur errechnet. Um dazu den dynamischen Einschwingvorgang des Ge-

Dieses Ergebnis gilt nur für die hier gestellte Bedingung, daß die Halle ganzjährig bei Minimaltemperaturen von 5–6° C gehalten werden soll. Wären höhere Temperaturen z. B. ganzjährig 15° C gefordert, ergäben sich ganz andere Ergebnisse, die dann natürlich auch andere Interpretationen zur Folge haben.

Völlig anderer Art ist die Aufgabe, die wir als

Beispiel 2

gewählt haben. Es handelt sich hier um eine reine Brauch-WW-Anlage. Wir bringen sie in der nächsten Ausgabe der Sonnenenergie.

Anschrift: Dipl.-Ing. (FH) Guido von Thun, Ludwig Feuerbachstraße 29, 8500 Nürnberg, (09 11) 55 09 59, Beratender Ingenieur.

Bestehende Halle	Heizöl		Jahresnutzungsgrad d. Kessels %	Lastspitze f. Heizung kW	Gesamtkosten inkl. Strom DM
	MWh	DM			
Alternative 1	158	8400	24,3	103	11 300
Alternative 2	153	8100	23,1	97,8	11 000
Alternative 3	69	3600	8,1	26	6 500
Alternative 4	73	3900	8,9	28	6 800

Der Strombedarf für das Gebäude beträgt 15 MWh für ein Jahr.