

# Simulations-Programm hilft bei der Berechnung des Energieverbrauchs

*Neues System minimiert Betriebskosten*

Bei der Planung von Gebäuden kommt es heute darauf an, Wege zu finden, um den Energieverbrauch zu reduzieren. Leider fehlten bislang Computer-Programme, die detaillierte Informationen über den Energiebedarf vorherberechnen können. Jetzt gibt es auf dem Markt Gebäude-Simulations-Programme, mit denen der Planer entsprechende Vorhersagen machen kann. Auch der Bauherr profitiert davon, denn mit diesem System lassen sich Betriebskosten für Heiz- und Kühlanlagen schon im Planungsstadium einsparen. Was der Planer mit diesen Simulations-Programmen machen kann, schildert der folgende Aufsatz.



**Guido von Thun**  
Jahrgang 1947, Dipl.-Ing.,  
Seit 1988 Dozent für den  
Einsatz von Simulationsbe-  
rechnungen zur Energieein-  
sparung an der Technischen  
Akademie, Esslingen.

In der Vergangenheit wurde bei der Gesteuerung von Gebäuden und Anlagen im wesentlichen auf die Investitionskosten geachtet. Ziel der Anlagentechnik war, diese weitestgehend bestimmungsgemäß zu betreiben. Es gab keinen Zwang von seiten des Bauherrn, die Betriebskosten zu reduzieren – bestenfalls den schwachen Wunsch dazu. So wurden relativ einfache Berechnungstechniken angewandt, um Heizungs- und Kühllasten sowie Betriebskosten zu ermitteln. Während der Energiekrise in den 70er Jahren wurde der Energieverbrauch nicht nur eine Frage der Kosten, sondern auch eine Frage der Verfügbarkeit. Dies führte zu verschiedenen Ideen für Energieeinsparungen. Häufig wurden – und werden teilweise immer noch – apparative Lösungen gesucht, die nicht einmal in der Lage waren, ihre Gesteuerungsenergie einzusparen, geschweige denn den Energieverbrauch. Dem Prinzip folgend, die Probleme dort zu lösen, wo sie auftreten, richtete sich das Augenmerk erneut auf die Gebäude- und Anlagenauslegung. Um unterschiedliche Auslegungen und Fallstudien durchzuführen, entstand ein Bedarf an hochwertigen Berechnungswerkzeugen. Infolgedessen wurden schwerpunktmäßig neue Algorithmen entwickelt, um Lasten genauer zu berechnen.

## Programme minimieren die Kosten

Diese Anstrengungen führten zu Einstundentakt-Simulations-Programmen, die heutzutage für alle zugänglich sind. Diese Werkzeuge ermöglichen es dem Berater, das dynamische

Verhalten von Gebäuden zu ermitteln. So kann der Planer Gebäude, die Anlagengröße und die Fahrweisen optimieren, um die Investitions- und Betriebskosten zu minimieren, wobei gleichzeitig das thermische Komfortverhalten gesteigert werden kann.

## Dynamische Lasten komplett berechnen

Die Ermittlung von Heiz- und Kühllasten des thermischen Komforts sowie der Energieverbrauch sind im wesentlichen eine Funktion von:

- Umgebungsbedingungen wie Außentemperatur, Windgeschwindigkeit, Lüftungsverluste etc.,
- inneren Lasten wie Personen, Beleuchtung, Geräte etc.,
- materialabhängigen Größen wie thermische Wärmefähigkeit, Oberflächenrauheit etc.,
- architektonischer Gestaltung wie Fensteranteil, Gebäudeorientierung, Beschattungsvorrichtungen, etc.

Mit Ausnahme der Sonneneinstrahlung sind diese Größen in den meisten Berechnungstechniken enthalten. Werden Lasten gerechnet, führen konventionelle Methoden zu mehr oder weniger ausreichenden Werten bei Heizlasten. Kühllasten werden mit Hilfe von Näherungsverfahren für die Sonneneinstrahlung an Wänden und durch Fenster verwendet, wobei reflektive Beschichtungen für letztere nur kümmerlich Berücksichtigung finden. Viele Algorithmen beachten auch nur einen Einstrahlungswinkel, andere jedoch drei. Infiltrationslasten werden bei Auslegungsbedingungen berechnet. All diese Werte zusammen führen bei konventioneller Berech-

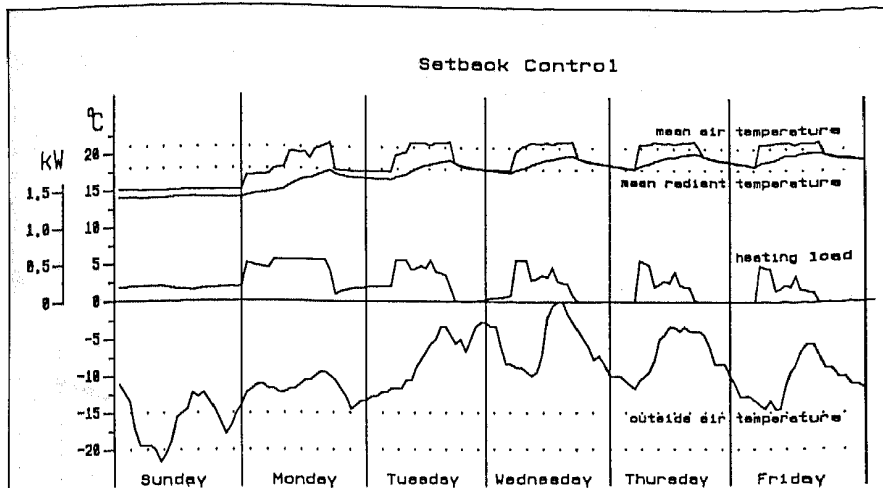


Abb. 1 stellt die Temperatur und das Heizlastprofil eines Gebäudeteils mit schwerer Bauweise dar, das als Büro genutzt wird. Die untere Kurve zeigt die Außentemperatur. Darüber ist die Heizlast zu sehen. Die zwei oberen Verläufe verdeutlichen die Lufttemperatur und die mittlere Raumstrahlungstemperatur.

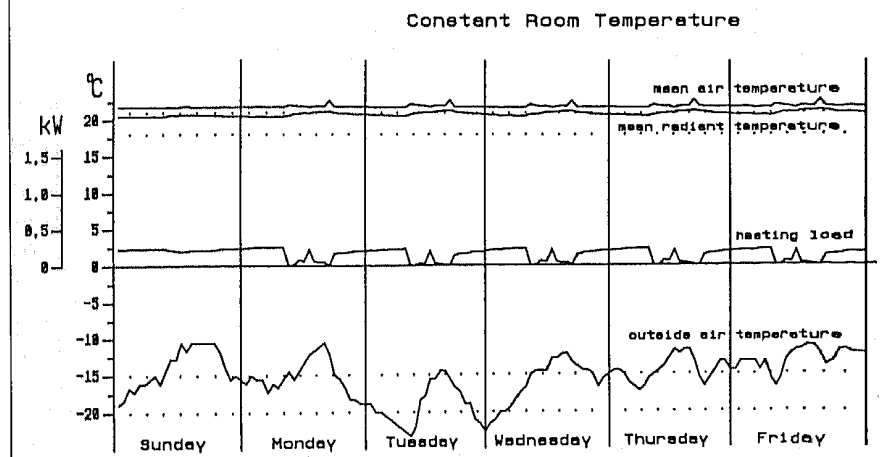


Abb. 2 zeigt den Effekt ohne Absenkung

nung zum Grundbedarf des Gebäudes.

## Den thermischen Trägheitseffekt berücksichtigen

Die meisten konventionellen Methoden unterdrücken wesentliche Lasteneinflüsse wie den thermischen Trägheitseffekt oder die dynamischen Anteile der Lasten. Dies ist leicht zu verstehen, wenn man eine schwere Konstruktion betrachtet. Um die gewünschten Komfortbedingungen nach einem komfortabgesenkten Wo-

chenende wiederherzustellen, kann der Zeitraum relativ lang sein, in Extremfällen zwei bis drei Tage. Auf der anderen Seite wird dieselbe Zeit benötigt, um herunterzukühlen. Dieser Zeitraum ist von folgenden Faktoren abhängig:

- der Temperaturdifferenz,
- der installierten Leistung für Heizung oder Kühlung,
- der Masse des Gebäudes,
- andere innere und äußere Lasten.

Diese dynamischen Lasten sind üblicherweise die dominanten Größen, da Temperaturänderungen durch Einsatz von Energie durchgeführt werden müssen. Um schnelle Änderungen vorzunehmen, durchläuft die Anlage instationäre Bedingungen, so daß für

eine relativ kurze Zeit alle Komponenten der Anlage und der Zentrale unter Vollast arbeiten. Betrachtet man jedoch die durchschnittliche Last während der Nutzungsdauer, so wird die allgemeine Auslastung niedriger. Infolgedessen steigt der Energiebedarf bei einer so dimensionierten Anlage. Daraus folgt, daß ein wesentliches Auslegungsziel ein „geglätteter“ Lastverlauf sein sollte. Ideal wäre ein Lastverlauf ohne jede Spitze – kleine Spitzen sind realistisch. Weiterhin sollten langsame Laständerungen ebenfalls ein Ziel der Anlagenkonzeption sein. Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, sollten Berechnungsmethoden verwendet werden, die das thermische Verhalten von Gebäuden so genau wie möglich nachvollziehen können. Diese Werkzeuge müssen das dynamische Lastverhalten genau modellieren und zu exakten Ergebnissen führen, insbesondere während des Auftretens von Teillastzuständen.

## Die Gestaltung beeinflusst die Gebäudelasten

Es gibt also viele Einflüsse auf die Gebäudelast, und es besteht kein Zweifel, daß Wetterbedingungen wie Außentemperatur, Windgeschwindigkeit und Sonneneinstrahlung die Grundlast wesentlich beeinflussen. Im Gegensatz zu diesen festen Faktoren kann die architektonische Gestaltung eines Gebäudes auf diese Werte einwirken. Dies betrifft insbesondere die Ausführung der Hüllfläche und des zugehörigen Fensterflächenanteils des Gebäudes, der einen Schwachpunkt in der Gebäudeumfassungsfläche darstellt. Während der reine k-Wert für Heizung und Kühlung wichtig ist, haben Lichtdurchlässigkeit und Reflexionsfähigkeit der Fenster einen erheblichen Einfluß auf die Kühllast. Die Ausführung der Fenster ist deshalb von Bedeutung, da die im Sommer unerwünscht hohe Lichtdurchlässigkeit und infolgedessen eine höhere Energiedurchlässigkeit durch die Einstrahlung im Winter die Heizlasten reduziert. Also müssen für die Optimierung der architektonischen Gestaltung eines Gebäudes Lösungen gefunden werden, die den bestmöglichen Kompromiß für jahreszeitliche Einflüsse darstellen. Auch die Windgeschwindigkeit, die zur Infiltration durch Fugen führt, wirkt auf die Lasten, die aus ge-

wünschten oder unerwünschten Öffnungen in der äußeren Hüllfläche entstehen. Deshalb können sie nur zu einem geringen Maß in der Energieoptimierung integriert werden. Aber für die Berechnung ist es unerheblich, ob Infiltrationslasten bei geöffneten Fenstern oder Fehlkonstruktionen in der Fassade entstehen. Ferner müssen die inneren Lasten, die nur zu bestimmten Zeiten und bestimmten Größen auftreten, berücksichtigt werden. Am bedeutendsten sind hier die thermischen Belastungen durch Personen, elektrische Geräte und Beleuchtung, die die Kühllast im Sommer erhöhen und im Winter die Heizlast senken.

## Die zeitliche Abhängigkeit berücksichtigen

All diese Einflüsse auf die Gebäudelasten treten zu unterschiedlichen Zeiten auf. In manchen Fällen müssen sie gegeneinander aufaddiert werden (z.B. Sonneneinstrahlung und innere elektrische Lasten), in anderen Fällen kompensieren sie sich jedoch (z.B. Senkung der Heizlast bei allen internen Wärmelasten). Deswegen muß bei der Berechnung der Gebäudelasten die zeitliche Abhängigkeit Berücksichtigung finden. Üblicherweise ermitteln die Planer die maximalen Lasten für den Heiz- oder Kühlfall mit konventionellen Methoden. Mit diesem Wert nehmen sie die Dimensionierung der Anlagen vor. Dies führt in sehr vielen Fällen zu erheblicher Überdimensionierung.

Schließlich muß dem thermischen Trägheitsverhalten Rechnung getragen werden. Bleibt die Temperatur in einem Raum konstant, zeigt sich nach einer bestimmten Zeit der thermische Trägheitseffekt, wenn sich die externen und internen Einflüsse verändern. Die von der Gebäudeträgheit abhängigen Heiz- und Kühllasten treten später in Erscheinung, wobei bei einem Gebäude mit schwerer Konstruktion die Verspätungen größer sind als bei einem mit leichter Konstruktion. In einem schweren Gebäude, im Extremfall einem Bunker, machen sich kurzfristige Änderungen überhaupt nicht bemerkbar.

Unzählige Computer-Programme, die den konventionellen Berechnungsmethoden (DIN-Normen oder andere Normen) entsprechen, gibt es

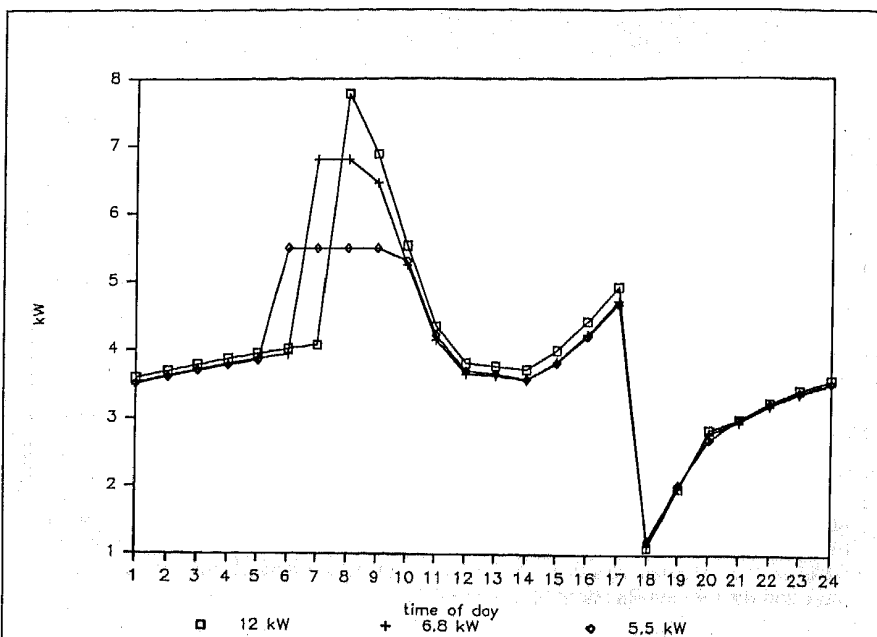


Abb. 3

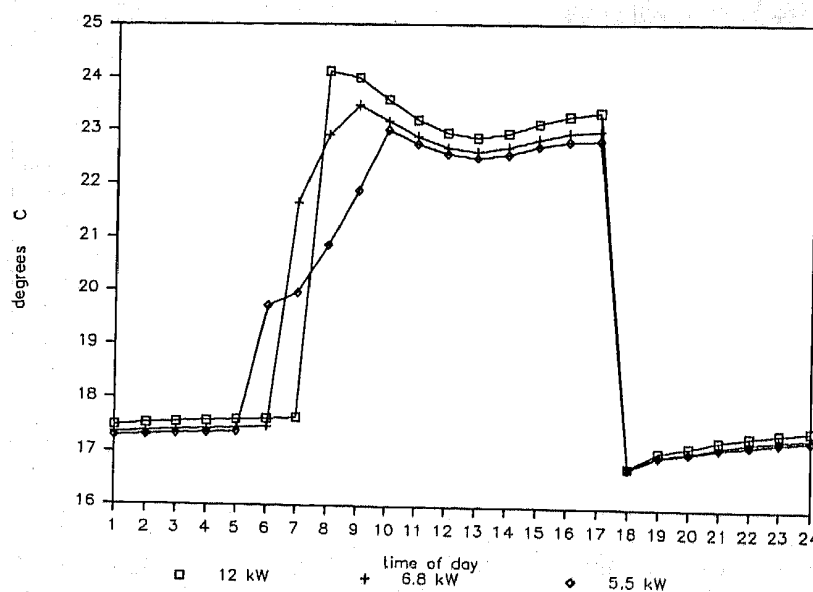


Abb. 4

Abb. 3 und 4 verdeutlichen, daß thermischer Komfort zu Arbeitsbeginn am Morgen entweder durch hohe Heizleistung während einer kurzen Periode oder durch langfristiges Vorheizen während einer längeren Periode gedeckt werden kann. Mit der Zunahme der Vorheizmethode läßt sich die erforderliche Geräteleistung reduzieren.

auf dem Markt, die die minimalen Anforderungen für die Anlagenauslegung erfüllen. Alle bestehenden Normen und so auch die Berechnungs-Programme beanspruchen keine physikalische Genauigkeit. Solange es nur darum geht, die Maximallasten zu bestimmen, reichen sie für durchschnitt-

liche Gebäude. Will der Planer jedoch Energieverbräuche für Zeitperioden vorhersagen, sind sie sehr ungenau in den Ergebnissen, da sie wichtige Parameter wie instationäres Verhalten oder wesentliche Einflüsse aus Regelstrategien überhaupt nicht oder nur ungenügend berücksichtigen.

LESEN SIE WEITER AUF SEITE 30

genden zwei Beispiele zeigen, wie unterschiedliche Regelstrategien und Fahrweisen von Anlagen den thermischen Komfort und die Anlagenlasten beeinflussen. Die Ergebnisse basieren auf der Anwendung eines Programms, das die Gebäudeenergie auf der Basis von Wärmeübertragungsfunktionen stündlich simulierte und den thermischen Gleichgewichtszustand für jede Stunde ermittelte. An den Wochenenden senkte man die Nachttemperatur auf 15° C (siehe Abb. 1). Die Folge war, daß die mittlere Raumstrahlungstemperatur auf ca. 14° C in der Nacht fiel. Schaltete sich die Heizung sonntagnachts an, betrug montags zu Beginn der Bürozeit die Temperatur rund 20° C. Die mittlere Raumstrahlungstemperatur maß jedoch zu dieser Zeit erst 16° C und überschritt im Laufe des Tages 17,5° C nicht. Abends trat die Temperaturabsenkung wieder in Kraft, so daß nur eine geringe Energiemenge den Raumumfassungenflächen zugeführt wurde. Am nächsten Tag (dienstags) erreichte die mittlere Raumstrahlungstemperatur mittags 18° C, was für ausreichende Komfortbedingungen notwendig wäre. Erst am dritten Tag (mittwochs) war eine weitgehend behagliche Temperatur für die gesamte Belegungszeit vorhanden. Es ist bemerkenswert, daß während dieses Verlaufs die Außentemperatur tagsüber nicht unter -15° C absank.

### *Wenig Leistung außerhalb der Spitzen nötig*

Das Heizlastprofil zeigt Spitzen, die in den Morgenstunden typisch sind für Absenkestrategien. Die relativ hohen Spitzenlasten von 500 bis 600 Watt müssen natürlich bei den Anlagen und von der Zentrale bereitgestellt werden, was zu relativ hohen Bereitstellungsleistungen auf der Anlagenseite führt. Außerhalb der Spitzenlastzeiten, insbesondere am Wochenende, sind bemerkenswert niedrigere Leistungen erforderlich, und das System wird im Teillastbereich beaufschlagt.

Um das Problem des unzureichenden thermischen Komforts während der Morgenstunden nach längeren Absenkeperioden zu lösen, wurden verschiedene Regelstrategien untersucht. Ohne Absenkung ist der Heizlastverlauf ausgeglichen und verläuft konstant mit Ausnahme der Bürobele-

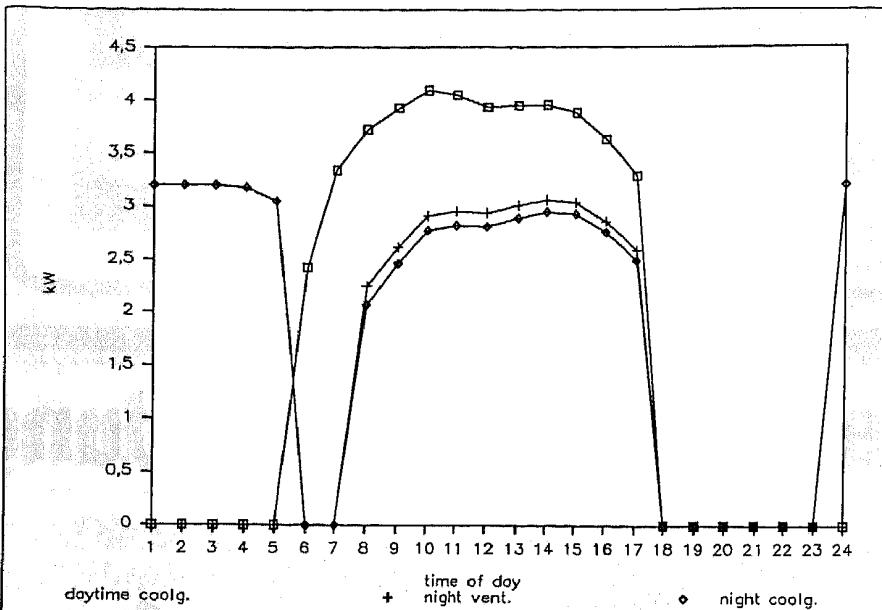


Abb. 5

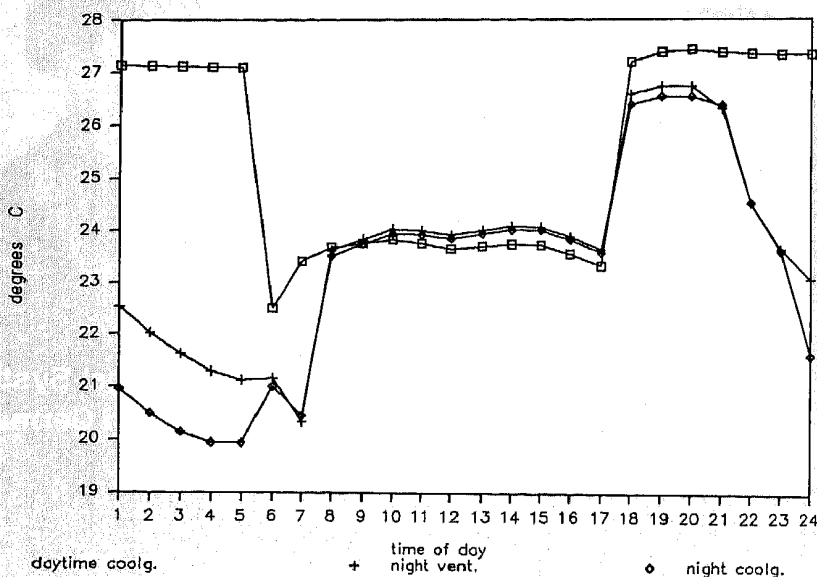


Abb. 6

Abb. 5 und 6 zeigen im ersten Verlauf das thermische Verhalten eines Raumes, der morgens gekühlt wird und während der Arbeitszeiten in Betrieb ist, mit den entsprechenden Lasten. Nachts sind die Anlagen ausgeschaltet.

Es gibt aber Simulations-Programme, die dem dynamischen Verhalten Rechnung tragen und längere Zeitperioden simulieren können. Die Zeitintervalle für diese Berechnungen sind üblicherweise Einstundenschritte, was normalerweise ausreicht, um die thermische Trägheit eines Gebäudes zu berücksichtigen. Sie optimieren die Auslegung der Ge-

bäude unter Berücksichtigung der dynamischen Lasten. So kann der Planer den höchstmöglichen thermischen Komfort etablieren und gleichzeitig die Investitions- und Betriebskosten gering halten.

Eine Methode, die die Auslegung optimiert, wurde mehrfach erfolgreich angewandt und bewies seine Richtigkeit in ausgeführten Projekten. Die fol-

gungszeiten während der Woche (siehe Abb. 2). Die Temperatur für Raumluft und die mittlere Raumstrahlungstemperatur sind ebenso ausgeglichen. Die Temperaturen bewegen sich innerhalb eines Bereichs, der behagliche Bedingungen bringt. Besonders beachtenswert ist, daß der Heizverlauf keine signifikanten Spitzen aufweist. Die Folge ist, daß weder die Anlage (Heizungssystem) noch die Zentrale (Kessel) für Spitzenlasten ausgelegt werden müssen, sondern für die geringfügigen Konstantlasten dimensioniert werden können. Zusätzlich arbeiten die Komponenten in einem Bereich mit hohem Wirkungsgrad.

Aus diesem Beispiel läßt sich ersehen, daß längere Zeiträume betrachtet werden müssen, um Leistungs- und Verbrauchswerten Rechnung zu tragen. Im Vergleich zu konventionellen Berechnungsmethoden sind hier neue Vorgehensweisen notwendig. Für eine Heiz- und Kühllastberechnung reicht es nicht, einen einzigen Wert aus den Gebäudedaten zu ermitteln. Die Regelstrategie ist einzubeziehen, um die anlagentechnischen Komponenten so

knapp wie möglich auszulegen und Minimalanlagengrößen zu installieren (siehe Energieeinsparungsverordnung).

Um die Spitzenlasten so weit wie möglich zu reduzieren, verwendet man eine Iterationsmethode mit Hilfe von Simulations-Programmen. Hierbei sind alle Komponenten, die die Verläufe beeinflussen, berücksichtigt. Auch die architektonische Gestaltung läßt sich mit Ganzjahressimulationen optimieren. Die Modelle hierfür müssen so realistisch wie möglich sein. So hat z.B. ein Gebäude mit Fenstern, die eine reflektierende Schicht besitzen, einen höheren Energieverbrauch wie ein Gebäude mit klaren Fenstern. Da die Sonneneinstrahlung insbesondere während der Dämmerung oder starker Bewölkung reduziert ist, schaltet sich die Beleuchtung in den Gebäuden an. Infolgedessen wird ein Teil der Einsparung der Kühllast durch die Reflexionsschicht gegen einen höheren elektrischen Verbrauch bei der Beleuchtung in Kauf genommen.

Im Bereich der architektonischen Maßnahmen existieren viele Möglichkeiten, die die Energieverbrauchs-

werte beeinflussen. Dies sollte jedoch schon im Vorfeld untersucht werden. Nachdem alle Maßnahmen wie Dämmung, Gestaltung der Fassaden, Beschattungsvorrichtungen und andere energiesparende Maßnahmen in das Grundkonzept eingeflossen sind, sollten die Regelstrategien und Fahrweisen optimiert werden. Hierfür sind Minimalbedingungen für den thermischen Komfort in Abhängigkeit der Nutzung der Räume festzulegen. Bürogebäude sind üblicherweise von 8–17 Uhr belegt, so daß während dieser Periode die thermischen Randbedingungen ausreichend sein müssen. Die Lufttemperatur sollte ca. 21° C für Heizung und nicht mehr als 27° C bei der Kühlung betragen. Für den Heizfall kommt es darauf an, daß die mittlere Raumstrahlungstemperatur nicht geringer als 18,5–19° C ist. Bei Gebäuden mit Lufttemperatur-Absenkung ist es wichtig, rechtzeitig hochzuheizen.

Der thermische Komfort zu Arbeitsbeginn kann entweder durch hohe Heizleistung während einer kurzen Periode oder durch langfristiges Vorheizen gedeckt werden. Es zeigt sich, daß die erforderliche Geräteleistung

# ELEKTRO TECHNIK



## 5.-8. SEPT. '90



Westfalahallen  
Dortmund

**Informativ und innovativ wie nie zuvor:**  
Über 600 Firmen aus dem In- und Ausland unterrichten über ihre neuesten Produkte. Deshalb haben Elektro-Fachleute und Elektroniker, gleich wo sie tätig sind, ob in Handwerk oder Industrie, ob im Großhandel oder EVU, ob in Werkstatt, Wartung, Montage oder Planung, den Besuch eingeplant. Denn hier werden sie über die aktuelle Entwicklung unterrichtet. Umfassend und eingehend. Über 500 Aussteller sind vertreten.

ELEKTRO-TECHNIK' 90 – umfangreicher, informativer und innovativer wie nie zuvor. Mit der Präsentation der gesamten Palette elektrotechnischer Produkte, inkl. der Bereiche Industrie-Elektronik, Meß-, Prüf-, Regel- und Steuerungstechnik, Industrie-Leittechnik, Automatisierungstechnik, technische Leuchten, Werkzeuge und Werkstatteinrichtungen, Informations- und Kommunikationstechnik sowie dem EDV-Zentrum.

Dazu die „Werk-Stadt“, die Gelegenheit bietet, durch Arbeitsproben neue technische Fertigkeiten zu erwerben. Nicht zu vergessen, das praxisorientierte Rahmenprogramm.

**ELEKTROTECHNIK '90** – umfassende, aber überschaubare Fachinformation auf über 40 000 qm Fläche.  
Dortmund 5.-8. Sept. - Ein Termin, der für jeden Fachmann Pflicht ist.

**Ideeller und fachlicher Träger:**  
 Fachverband Elektrotechnische Handwerke  
Nordrhein-Westfalen

**Informationen:**  
Westfalahallen Dortmund GmbH  
Messezentrum  
Postfach 10 44 44  
4600 Dortmund 1  
Telefax (02 31) 1 20 46 78

**Messezentrum Westfalahallen Dortmund**

**Stark verbilligte Sonderrückfahrkarte** an allen Bahnhöfen der DB. Mindestentfernung 51 km außerhalb VRR – plus Eintrittsermäßigung. Berechtigungskarten anfordern.

duzieren, und um 40/33% von Version B (vergleiche Tabelle 1).

## Programme senken hohe Lasten

Die dynamischen Lasten, die aus den wechselnden Bedingungen eines Gebäudes hervorgehen, können die thermischen Komfort-Randbedingungen, die erforderlichen Anlagengrößen und den gesamten Energiebedarf stark beeinflussen. Die hier vorgestellte Auslegungsmethode erlaubt es dem Planer, Systeme und Regelstrategien bzw. Fahrweisen zu optimieren, um die Spitzenlasten so weit wie möglich zu senken und aus der thermischen Trägheit des Gebäudes zu profitieren. Die Senkung der Spitzen erhöht das thermische Komfortverhalten und verringert die erforderliche Komponentengröße. Außerdem ist die Beschwerderate in Gebäuden, die so optimiert sind, sehr niedrig.

Die Anlagengrößen für diese Systeme sind typischerweise 30–50% kleiner als konventionell ausgelegte Systeme. Die kleineren Komponenten arbeiten zwar für einen längeren Zeitraum, jedoch in einem niedrigeren Teillastbereich, der den gesamten Wirkungsgrad erhöht. Auf den Bauherrn kommen niedrige Investitionskosten für kleinere Anlagen zu.

Der Einsatz von Gebäude-Simulations-Programmen ermöglicht es, das thermisch-dynamische Verhalten eines Gebäudes für ein ganzes Jahr ausreichend genau zu ermitteln. Diese Werkzeuge geben dem Planer Informationen über das Gebäude, die mit einfacheren Berechnungsmethoden nicht zu erhalten sind. Es ist wichtig, daß sie zukünftig Stand der Technik in der Auslegung werden. □

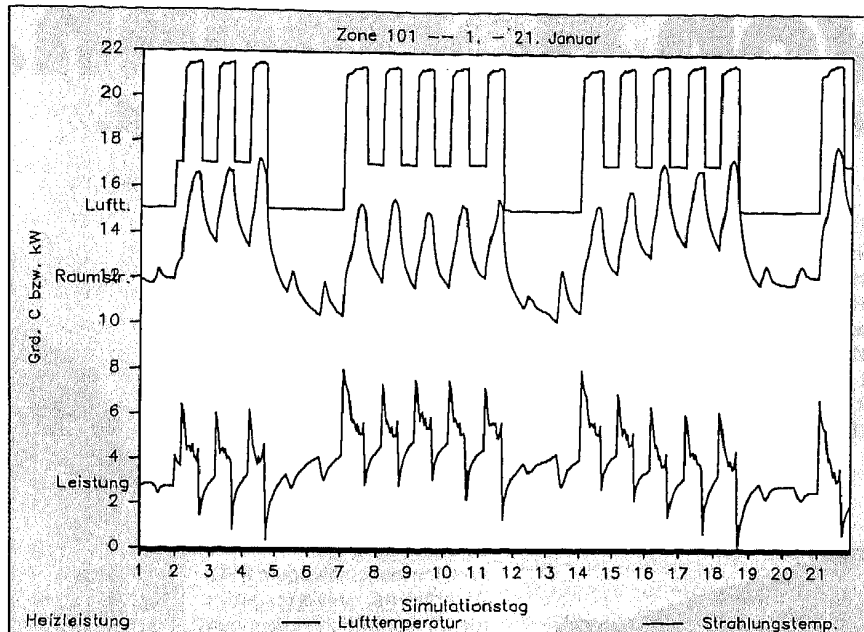


Abb. 9

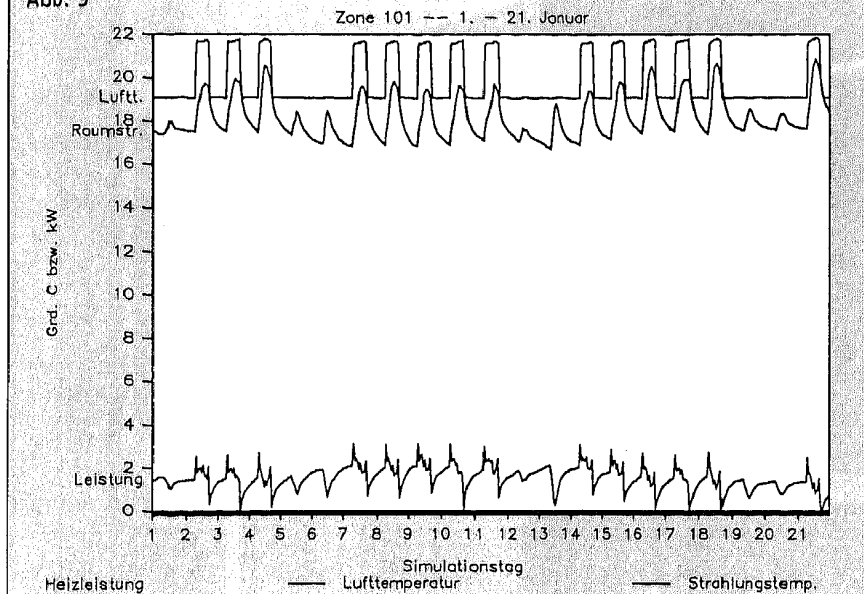


Abb. 10

Wie aus den Abb. 9 und 10 entnommen werden kann, sind die thermischen Komfortbedingungen erheblich günstiger. Bei Abb. 10 wird die kleinste Anlage benötigt.

Tabelle 1

	Temperatur belegt		Temperatur unbelegt		Zuluftmenge m <sup>3</sup> /h		Anlagengröße kW	
	Sommer	Winter	Sommer	Winter	Zone 101	Zone 102	Kessel	Kältemaschine
Ist-Version:	20–28	21	keine Kühlung	15–17	1 700	540	50	22
A gedämmt	20–28	21	keine Kühlung	15–17	1 300	450	25	12
B wenig abgesenkt	20–28	21	keine Kühlung	19	1 200	400	25	12
C lastabhängig	20–28	21	keine Kühlung	19	1 200	400	15	8

Diese Tabelle zeigt den Zusammenhang zwischen Dämmung, Zuluftmenge und Anlagengröße. Das Ausmaß der Kessel und Kältemaschinen ist bei der A-, B- und C-Version kleiner als bei konventionell ausgelegten Systemen.