



**Regelstrategien und Anlagenfahrweisen können sehr stark den Komfort und den Energieverbrauch, besonders in massiven Gebäuden, beeinflussen. Gebäude-Simulationsprogramme versorgen den planenden Ingenieur mit detaillierten Informationen über das dynamische Verhalten eines Gebäudes. Mit diesen**

**Informationen kann der Planer dann Leistungsdaten optimieren und die Betriebsweisen festlegen, um Vorteile aus der thermischen Trägheit des Gebäudes zu ziehen.**

**Durch die Verwendung von stündlichen Simulationsprogrammen werden Anlagen mit geringeren Leistungsbereitstellungen und höherem Komfort ermittelt. Diese Anlagen haben infolgedessen geringere Gesteungskosten und niedrigere Betriebskosten als konventionell ausgelegte Anlagen.**

**Nachfolgend wird eine Auslegungsmethode vorgestellt.**

Dipl.-Ing. (FH) Guido von Thun, Nürnberg

# Dynamisches Verhalten von Gebäuden nachvollziehen

**Anwendung von Simulationsprogrammen, um Anlagengröße und Fahrweise zu optimieren**

## Einleitung

In der Vergangenheit wurde bei der Gesteung von Gebäuden und Anlagen im wesentlichen auf die Investitionskosten geachtet. Ziel der Anlagentechnik war es, diese weitgehendst bestimmungsgemäß zu betreiben. Dies ist die Mindestbedingung für ingenieurmäßiges Arbeiten. Es gab keinen Zwang von seiten des Bauherrn zur Reduktion der Betriebskosten, es gab bestenfalls den schwachen Wunsch. So wurden relativ einfache Berechnungstechniken zur Ermittlung von Heiz- und Kühllasten und Betriebskosten angewandt.

Während der Energiekrise in den 70ern wurde der Energieverbrauch nicht nur eine Frage der Kosten, sondern auch eine Frage der Verfügbarkeit. Dies führte zu allen möglichen Ideen, wie Energie eingespart werden könnte. Häufig wurden – und werden teilweise immer noch – apparative Lösungen gesucht, die nicht einmal in der Lage waren, ihre Gesteungsenergie einzusparen, geschweige denn den Energieverbrauch. Dem Prinzip folgend, die Probleme sollten dort gelöst werden, wo sie auftreten, wurde der Gebäude- und Anlagenauslegung neues Augenmerk zuteil. Um unterschiedliche Auslegungen und Fallstudien durchzuführen, entstand ein Bedarf an hochwertigen Berechnungswerkzeugen. Infolgedessen wurden schwerpunktmäßig neue Algorithmen zur exakteren Berechnung von Lasten entwickelt.

Diese Anstrengungen führten zu stündlichen Simulationsprogrammen, die heutzutage für jeden zugänglich sind. Diese Werkzeuge ermöglichen es dem Berater, das dynamische Verhalten von Gebäuden zu ermitteln. Mit diesen Ergebnissen kann der Planer das Gebäude, die Anlagengröße und die Fahrweisen optimieren, um die Investitionskosten und Betriebskosten zu minimieren, wobei gleichzeitig das thermische Komfortverhalten gesteigert werden kann. Um diese Möglichkeiten darzulegen, ist es notwendig, eine kurze Zusammenfassung derjenigen Faktoren, die eine vollständige Berechnung von Gebäudelasten, insbesondere der dynamischen Lasten, ermöglichen, kurz darzulegen.

## Die Bedeutung der dynamischen Lasten

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

- Umgebungsbedingungen wie Außentemperatur, Sonneneinstrahlung, Windgeschwindigkeit, Lüftungsverluste etc.
- Inneren Lasten wie Personen, Beleuchtung, Gerätschaften etc.
- Materialabhängigen Größen wie thermische Wärmeleitfähigkeit, Oberflächenrauheit etc.

- Architektonischer Gestaltung wie Fensteranteil, Gebäudeorientierung, Beschattungsvorrichtungen etc.

Alle vorgenannten Größen, mit Ausnahme der Sonneneinstrahlung, sind in den meisten Berechnungstechniken enthalten.

Wenn Lasten gerechnet werden, führen konventionelle Methoden zu mehr oder weniger ausreichenden Werten bei Heizlasten. Kühllasten werden mit Hilfe von Näherungsverfahren für die Sonneneinstrahlung an Wänden und Sonneneinstrahlung durch Fenster verwendet. Reflektive Beschichtungen für letzte werden in einer unzureichenden Art und Weise berücksichtigt. Viele Algorithmen berücksichtigen nur einen Einstrahlungswinkel, andere jedoch drei. Infiltrationslasten werden bei Auslegungsbedingungen berechnet. All diese Werte zusammen führen bei der konventionellen Berechnung zum Grundbedarf des Gebäudes.

Einer der wesentlichen Lasteinflüsse wird in den meisten konventionellen Methoden unterdrückt – der thermische Trägheitseffekt oder die dynamischen Anteile der Lasten. Dies ist einfach zu verstehen, wenn eine schwere Konstruktion betrachtet wird. Der Zeitraum, um die gewünschten Komfortbedingungen nach einem abgesenkten Wochenende wieder herzustellen, kann relativ lang sein. In extremen Situationen 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 und von
- anderen inneren oder äußeren Lasten.

Diese dynamischen Lasten sind üblicherweise die dominanten Größen, da Temperaturänderungen durch Einsatz von Energie verursacht werden. Um schnelle Änderungen durchzuführen, durchläuft die Anlage instationäre Bedingungen. Infolgedessen werden für eine relativ kurze Zeit alle Komponenten der Anlage und der Zentrale unter Vollast arbeiten. Betrachtet man jedoch die durchschnittliche Last während der Nutzungsdauer, wird die allgemeine Auslastung erheblich niedriger sein. Infolgedessen wird der Energiebedarf bei einer solchermaßen dimensionierten Anlage steigen.

Daraus folgt, daß eines der wesentlichen Auslegungsziele ein „geglätteter“ Lastverlauf sein sollte. Ein Lastverlauf ohne jede Spitze wäre ideal – kleine Spitzen sind realistisch. Weiterhin sollten langsame Laständerungen ebenfalls ein Ziel der Anlagenkonzeption sein. Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, sollten Berechnungs-

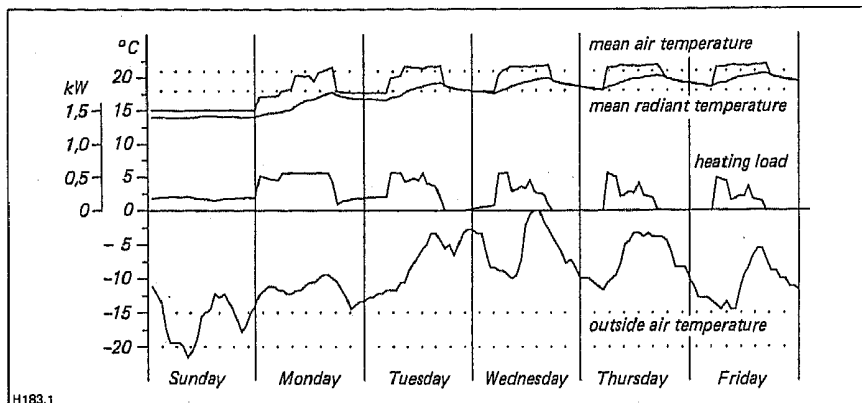


Bild 1: Temperatur- und Heizlastprofil bei Nacht- und Wochenendabsenkung

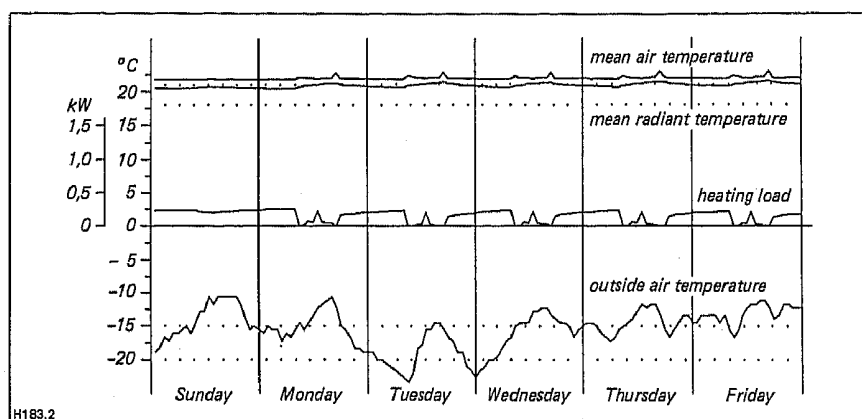


Bild 2: Temperatur- und Heizlastprofil ohne Absenkung

methoden verwendet werden, die das thermische Verhalten von Gebäuden so genau wie möglich nachvollziehen können. Diese Werkzeuge müssen das dynamische Lastverhalten genau modellieren und zu genauen Ergebnissen führen, insbesondere während des Auftretens von Teillastzuständen.

### Die Komplexität von Gebäudelastberechnungen

Wie bereits ausgeführt, gibt es eine Menge Einflüsse auf die Gebäudelast. Es besteht kein Zweifel, daß Wetterbedingungen wie Außentemperatur, Windgeschwindigkeit und Sonneneinstrahlung die wesentlichen Anteile für die Grundlast bringen. Für den Standort des Gebäudes jedoch können diese als fest angenommen werden und unterliegen keinerlei Beeinflussung.

Die architektonische Gestaltung eines Gebäudes jedoch beeinflusst diese Werte stark. Dies bezieht sich insbesondere auf die Ausführung der Hüllfläche und des zugehörigen Fensterflächenanteils des Gebäudes. Fenster stellen natürlicherweise einen Schwachpunkt in der Gebäudeumfassungsfläche dar, denen ein besonderes Augenmerk zu gelten hat. Während der

reine  $k$ -Wert sowohl für Heizung und Kühlung wichtig ist, haben die Lichtdurchlässigkeit und die Reflexionsfähigkeit der Fenster einen erheblichen Einfluß auf die Kühllast. Die Ausführung der Fenster ist insbesondere deswegen von Bedeutung, da diejenigen Eigenschaften, die im Sommer nicht wünschenswert sind (hohe Lichtdurchlässigkeit, infolgedessen eine höhere Energiedurchlässigkeit durch Einstrahlung durch die Fenster), einen wünschenswerten Nebeneffekt haben, die Heizlasten im Winter zu reduzieren. Daraus folgt, daß für die Optimierung der architektonischen Gestaltung eines Gebäudes Lösungen gefunden werden müssen, die den bestmöglichen Kompromiß für jahreszeitliche Einflüsse darstellen.

Weitere Einflüsse auf die Lasten von der Umgebung sind Windgeschwindigkeit und infolgedessen Infiltration durch Fugen. Diese Lasten folgen jedoch aus gewünschten oder ungewünschten Öffnungen in der äußeren Hüllfläche des Gebäudes. Daher können diese nur zu einem geringen Maß in die Energieoptimierung mit eingeführt werden. Für die Berechnung jedoch ist es unerheblich, ob Infiltrationslasten durch geöffnete Fenster oder Fehlkonstruktionen in der Fassade entstehen.

Weitere grundlegende Faktoren für die Lasten sind die Orientierung des Gebäudes und architektonische Maßnahmen wie Beschattungseinrichtungen. Diese sollen hier nicht diskutiert, sondern nur der Vollständigkeit halber erwähnt werden.

Für die Diskussion hier ist es grundlegend erforderlich, die inneren Lasten mit einzubeziehen. Diese, wie auch die bereits erwähnten, treten nur zu bestimmten Zeiten und in bestimmten Größen auf. Am bedeutendsten sind die thermischen Lasten durch Personenbelegung, elektrische Geräte und Beleuchtung. Naturgemäß erhöhen diese Lasten die Kühllast im Sommer und erniedrigen die Heizlast im Winter.

Alle bisher genannten 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. Erniedrigung der Heizlast bei allen internen Wärmelasten). Infolgedessen ist es für die Berechnung der Gebäudelasten erforderlich, die zeitliche Abhängigkeit mit zu berücksichtigen. Üblicherweise werden mit konventionellen Methoden die maximalen Lasten für den Heiz- oder Kühlfall ermittelt. Mit diesem Wert werden die Anlagendimensionierungen vorgenommen. Es ist ersichtlich, daß dies zu erheblicher Überdimensionierung in sehr vielen Fällen führt.

Schließlich muß noch dem thermischen Trägheitsverhalten des Gebäudes Rechnung getragen werden. Wird ein Raum auf einer konstanten Temperatur gehalten, zeigt sich der thermische Trägheitseffekt bei Änderung der externen und internen Einflüsse nach einer bestimmten Zeit. Heiz- und Kühllasten werden in Abhängigkeit der Trägheit des Gebäudes verzögert in Erscheinung treten. Es ist nicht schwer zu erkennen, daß ein Gebäude mit einer schweren Konstruktion größere Verzögerungen bewirkt als ein Gebäude mit einer leichten Konstruktion. Im Falle einer leichten Betonkonstruktion werden alle externen und internen Einflüsse eine direkte Auswirkung auf die Lasten haben. In einem schweren Gebäude (im Extremfall einem Bunker) werden sich kurzzeitige Änderungen überhaupt nicht bemerkbar machen. Dies ist offensichtlich, und man kennt das aus Alltagsbeobachtungen.

### Die Vorteile von Gebäudesimulationsprogrammen

Es sind unzählige Computerprogramme, die den konventionellen Berechnungsmethoden (entsprechend der DIN-Norm oder anderen Normen) entsprechen, auf dem Markt erhältlich. Es soll hier unterstrichen werden, daß diese, wie alle normenorientierten Spezifikationen, die minimalen An-

forderungen für die Auslegung von Anlagen darstellen. Alle bestehenden Normen, infolgedessen auch die Berechnungsprogramme, die ihnen zugrunde liegen, beanspruchen keine physikalische Genauigkeit. Solange es nur darum geht, die Maximallasten zu bestimmen, sind diese für durchschnittliche Gebäude ausreichend. Werden diese jedoch zugrunde gelegt, um Energieverbräuche für Zeitperioden wie ein Jahr vorzusagen, führen sie zu sehr hohen Ungenauigkeiten in den Ergebnissen. Hierfür besonders wichtige Parameter werden überhaupt nicht oder nur ungenügend berücksichtigt. In den meisten Fällen ist instationäres Verhalten unzureichend berücksichtigt, wenn nicht gar vernachlässigt. Wesentliche Einflüsse aus Regelstrategien werden nicht berücksichtigt.

Aus den vorgenannten Gründen wurden besondere Simulationsprogramme entwickelt, die dem dynamischen Verhalten Rechnung tragen. Die Grundlagen hierfür sind allgemein bekannte physikalische Zusammenhänge, sowie die Wärmeübertragungsfunktionen, wie sie im ASHRAE-Handbook of Fundamentals 1989 beschrieben sind. Diese Berechnungsprogramme sind in der Lage, längere Zeitperioden zu simulieren. Die Zeitintervalle für diese Berechnungen sind üblicherweise Einstundenschritte, was normalerweise ausreichend ist, um die thermische Trägheit eines Gebäudes zu berücksichtigen. Diese Werkzeuge ermöglichen eine Optimierung der Auslegung mit Rücksichtnahme auf die dynamischen Lasten von Gebäuden. Dies gestattet dem Planer, den höchstmöglichen thermischen Komfort bei gleichzeitig geringster Investition und geringsten Betriebskosten zu etablieren.

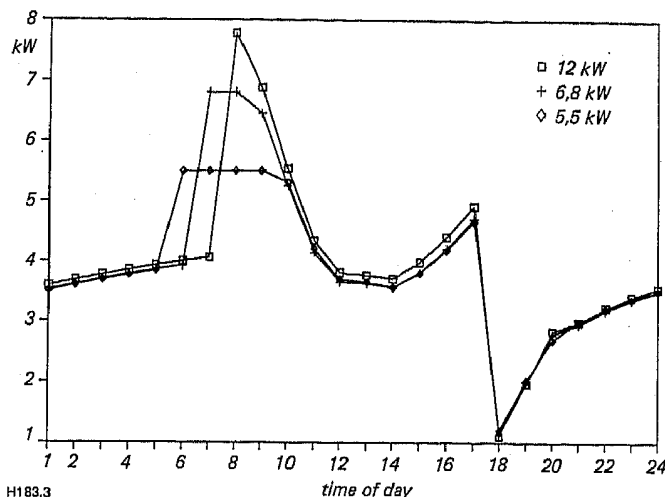
### Die Methode der Auslegungsoptimierung

Eine Methode der Optimierung von Auslegung soll hier dargestellt werden. Diese wurde mehrfach mit großem Erfolg angewandt und bewies ihre Richtigkeit in ausgeführten Projekten. Es werden zwei Beispiele dargelegt, die zeigen, wie unterschiedliche Regelstrategien und Fahrweisen von Anlagen den thermischen Komfort und die Anlagenlasten beeinflussen. Die dargelegten Ergebnisse wurden durch Anwendung eines stündlichen Gebäude-Energiesimulationsprogrammes auf der Basis von Wärmeübertragungsfunktionen und Ermittlung des thermischen Gleichgewichtszustandes für jede Stunde gewonnen.

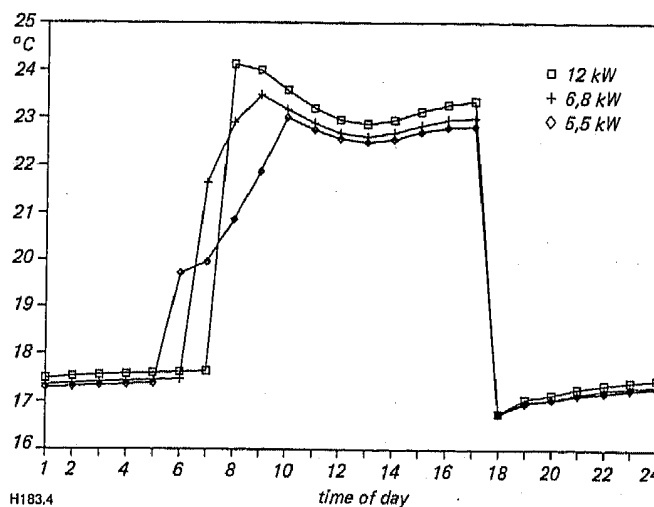
#### Beispiel 1

Bild 1 zeigt die Temperatur und das Heizlastprofil eines Teils eines Gebäudes mit schwerer Bauweise, das als Büro genutzt wird. Der untere Verlauf zeigt die Außen-

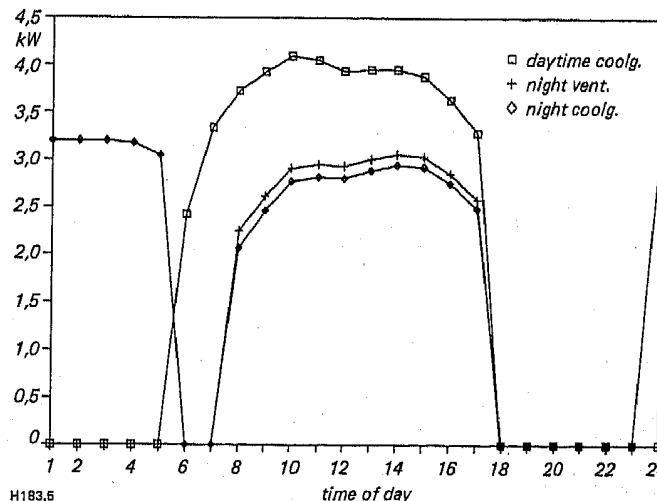
**Bild 3: Heizlastkurven nach Nachtabsenkung für verschiedene Leistungen**



**Bild 4: Raumluft-Temperaturkurven nach Nachtabsenkung für verschiedene Leistungen**



**Bild 5: Kühllasten bei verschiedenen Fahrweisen**



temperatur. Darüber ist die Heizlast für diesen Raum dargestellt. Die zwei oberen Verläufe zeigen die Lufttemperatur und die mittlere Raumstrahlungstemperatur in der Zone. Das Gebäude wurde nachts auf 15 °C während Wochenenden abgesenkt. Infolgedessen fiel die mittlere Raumstrahlungstemperatur auf ca. 14 °C während der Nachtzeit. Wenn die Heizung um Mitternacht am Montag angefahren wurde, wurde eine Raumlufttemperatur von ca. 20 °C zu Beginn der Bürozeit erreicht. Die

mittlere Raumstrahlungstemperatur jedoch betrug zu dieser Zeit erst 16 °C. Im Verlauf des Tages überschreitet die mittlere Raumstrahlungstemperatur nicht 17,5 °C. Abends trat die Temperaturabsenkung wieder in Kraft, so daß nur eine geringe Energiemenge den Raumumfassungsflächen zugeführt wird. Am nächsten Tag (Dienstag) ist es bereits mittags, bevor die mittlere Raumstrahlungstemperatur den Wert von 18 °C erreicht, der für ausreichende Komfortbedingungen notwendig ist. Erst am



dritten Tag (Mittwoch) ist eine weitgehend behagliche Temperatur für die gesamte Belegungszeit vorhanden. Es ist bemerkenswert, daß während dieses Verlaufs die Außentemperatur tagsüber nicht unter  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  absank. Das Heizlastprofil zeigt Spitzen, die typisch sind für die Morgenstunden für Absenkerstrategien. Die relativ hohen Spitzenlasten von 500 bis 600 W

müssen natürlich bei den Anlagen und von der Zentrale bereitgestellt werden. Dies führt zu relativ hohen Bereitstellungsleistungen auf der Anlagenseite. Außerhalb der Spitzenlastzeiten, insbesondere am Wochenende, sind bemerkenswert niedrigere Leistungen erforderlich und das System wird im Teillastbereich beaufschlagt. Es wurden verschiedene Regelstrategien

untersucht, um das Problem des unzureichenden thermischen Komforts während der Morgenstunden nach längeren Absenkerperioden zu lösen. Bild 2 zeigt den Effekt ohne Absenkung. Der Heizlastverlauf ist sehr ausgeglichen und zeigt grundsätzlich einen konstanten Verlauf mit Ausnahme der Bürobelegungszeiten während der Woche. Die Raumtemperaturverläufe für Raumluft und mittlere Raumstrahlungstemperatur sind ebenso sehr ausgeglichen. Die Temperaturbereiche liegen innerhalb eines Bereiches, der ausreichend behagliche Temperaturbedingungen bringt. Besonders beachtenswert ist, daß der Heizlastverlauf keine signifikanten Spitzen aufweist. Infolgedessen müssen weder die Anlage (Heizsystem) noch die Zentrale (Kessel) für Spitzenlasten ausgelegt werden, sondern sie können für die geringfügigen Konstantlasten dimensioniert werden. Zusätzlich arbeiten die Komponenten in einem Bereich mit hohem Wirkungsgrad.

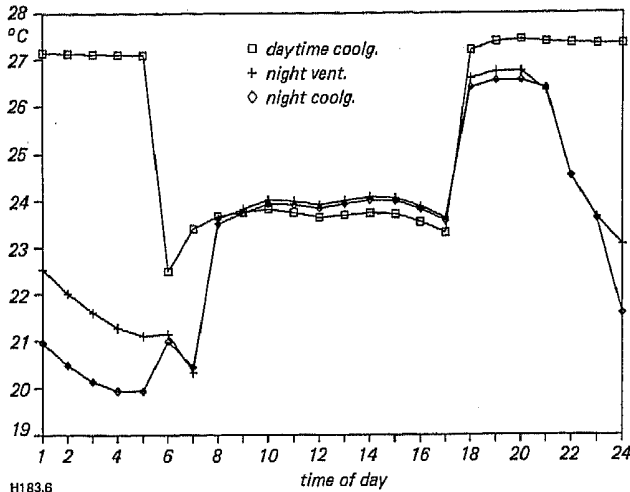


Bild 6: Raumlufttemperaturen entsprechend den Fahrweisen in Bild 5

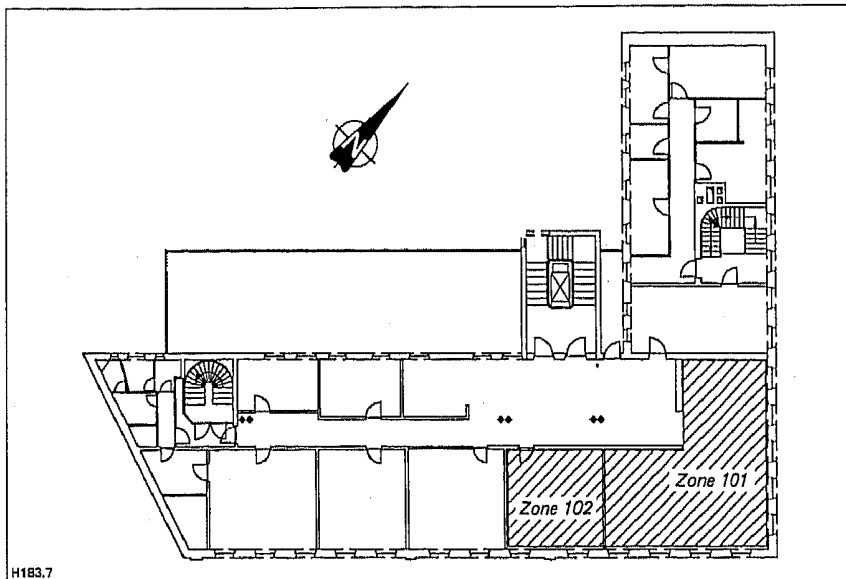


Bild 7: Separate Betrachtung von zwei Zonen (schraffiert) in einem Bankgebäude

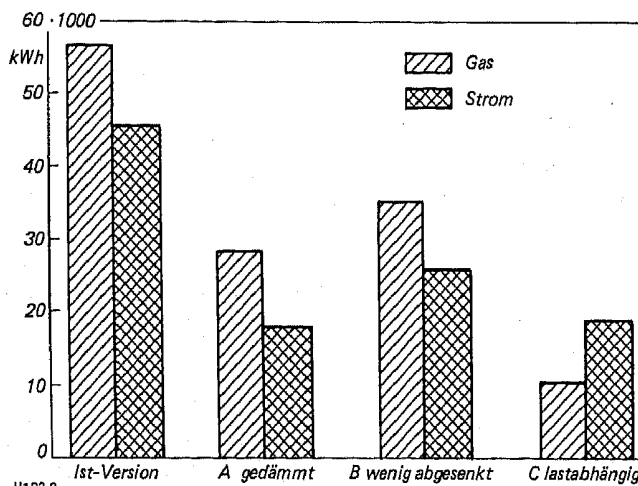
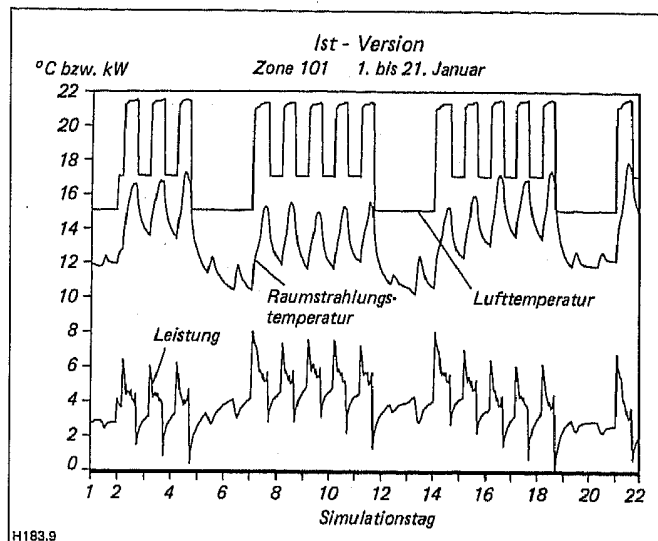
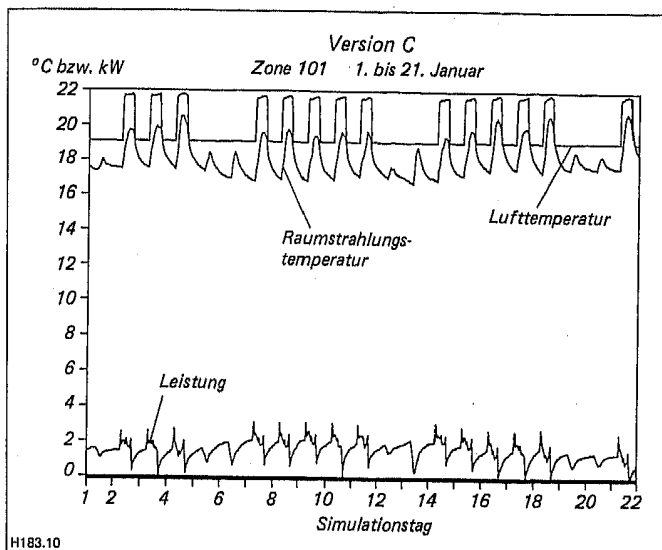


Bild 8: Zugehörige Jahresenergieverbräuche der verschiedenen Versionen

### Diskussion der Methode

Aus diesem Beispiel kann ersehen werden, daß längere Zeiträume betrachtet werden müssen, um sowohl Leistungs- als auch Verbrauchswerten Rechnung zu tragen. Im Vergleich zu konventionellen Berechnungsmethoden sind hier neue Vorgehensweisen nötig. Es ist nicht ausreichend, für eine Heiz- und Kühllastberechnung einen einzigen Wert aus den Gebäudedaten ohne Berücksichtigung der Regelstrategie zu ermitteln. Insbesondere ist es wichtig, um die anlagentechnischen Komponenten so knapp wie möglich auszulegen und Minimalanlagengrößen zu installieren (Energieeinsparungsverordnung).

Die Grundidee ist es, die Spitzenlasten so weit wie möglich zu reduzieren. Es wird darum eine Iterationsmethode mit Hilfe von Simulationsprogrammen verwendet. Hierbei werden alle Komponenten, die Einfluß auf die Verläufe haben, berücksichtigt. Dies bedeutet, daß, sofern es möglich ist, auch auf die architektonische Gestaltung Einfluß genommen wird. Letztere kann ebenfalls durch Ganzjahressimulationen optimiert werden. Die Modelle hierfür müssen so realistisch wie möglich sein. Für ein Gebäude mit Fenstern, z.B. mit einer reflektiven Schicht, muß mit einem höheren elektrischen Energieverbrauch gerechnet werden als in einem Gebäude mit klaren Gläsern. Da die Sonneneinstrahlung insbesondere während der Dämmerungszeiten oder starker Bewölkung reduziert ist, wird die Beleuchtung in den Gebäuden angeschaltet werden. Infolgedessen wird ein Teil der Einsparung der Kühllast durch die Reflexionsschicht gegen Inkaufnahme eines höheren elektrischen Verbrauchs bei der Beleuchtung in Kauf genommen.



Bilder 9 und 10: Zugehörige thermische Komfortbedingungen (Zone 101) für die Ist-Version (oben) und die Version C

Bilder: Verfasser

In dem Bereich der architektonischen Maßnahmen gibt es eine Fülle von Möglichkeiten, die in die Energieverbrauchswerte eingreifen. Diese sollten jedoch im Vorfeld schon untersucht werden. Nachdem alle Maßnahmen wie Dämmung, Gestaltung der Fassade, Beschattungsvorrichtungen und andere energieeinsparende Maßnahmen in das Grundkonzept eingebracht wurden, sollte eine Optimierung der Regelstrategien und Fahrweisen festgelegt werden. Hierfür muß man Minimalbedingungen für den thermischen Komfort in Abhängigkeit der Nutzung der Räume festlegen. Bürogebäude sind üblicherweise von 8.00 bis 17.00 Uhr belegt, so daß während dieser Periode die thermischen Randbedingungen ausreichend sein müssen. Die Lufttemperatur sollte um ca. 21 °C bei Heizung und nicht größer als 27 °C bei Kühlung sein. Für den Heizfall ist es von hoher Bedeutung, daß die mittlere Raumstrahlungstemperatur nicht geringer als 18,5 bis 19 °C ist. Wenn Gebäude mit Absenkung betrieben werden, ist es wichtig, eine rechtzeitige Hochheizung vorzunehmen. Die Bilder 3 und 4 zeigen verschiedene Heizlastkurven nach einer Absenkperiode während der Nacht mit den entsprechenden zugehörigen Temperaturverläufen.

Die Kurven zeigen, 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. Hieraus kann ebenfalls deutlich entnommen werden, daß die erforderliche Geräteleistung mit Zunahme der Vorheizperiode reduziert werden kann.

Durch entsprechende Anpassung der Geräteleistung und der Vorheizperiode ist es möglich, eine Minimierung der Lastspitzen während der Hochheizzeit zu erreichen. Da nun eine Minimierung der Gerätegröße

Tabelle: Gesamtenergieverbrauch (Gas und Strom) für die verschiedenen Versionen

	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

sich im Investitionskostenbereich auswirkt, ist dies eines der erstrebenswertesten Ziele.

Grundsätzlich gilt das für Heizlasten. Gesagte ebenfalls für die Kühllastermittlung. Die Vorgehensweise ist jedoch etwas unterschiedlich. Im Kühllastfall sind die Temperaturbereiche für noch zulässige Temperaturen von hoher Bedeutung. Im Fall von Computerräumen z.B. ist eine Abweichung von maximal  $\pm 1$  °C gestattet. Somit gibt es kaum Optimierungsmöglichkeiten. Jedoch in Büroräumen, wenn ein Gleiten von 21 °C am Morgen auf 27 oder 28 °C am Nachmittag erlaubt ist, gibt es eine Fülle von Optimierungsmöglichkeiten. Diese sind in den Bildern 5 und 6 dargestellt. Sie zeigen im ersten Verlauf das thermische Verhalten eines Raumes, dessen Kühlung am Morgen startet und während der Arbeitszeiten in Betrieb ist, mit den entsprechenden Lasten. Nachts sind die Anlagen ausgeschaltet.

Der zweite Verlauf zeigt denselben Raum mit Anlagen, die nachts ohne aktive Kühlung arbeiten. Dies bedeutet, nichtthermisch aufbereitete Luft wird verwendet, um die Gebäudemasse während der Nacht herunterzukühlen.

Der Kern dieses Konzeptes ist es, die Wärme, die sich im Laufe des Tages im Gebäude gesammelt hat, nachts zu entfernen, während die Stromkosten hierfür

niedrig sind. Natürlich ist dies nur möglich, wenn die Außentemperatur entsprechend niedrig während der Nacht und in den Morgenstunden ist.

Sollte dies nicht der Fall sein, wie z.B. an schwülwarmen Sommertagen mit einer nur geringfügigen Nachtauskühlung, so kann aktive Kühlung auch während der Nacht bereitgestellt werden. D.h., während der Nachtstunden ist die Kälteanlage in Betrieb. Dies ist auf zwei Arten ökonomisch, da einerseits die Stromkosten nachts niedriger sind und der Wirkungsgrad der Kältemaschine durch die niedrigere Kondensationstemperatur erheblich höher ist. Dies ist mit dem dritten Verlauf dargestellt.

### Beispiel 2

Ein anderes Beispiel ist dargestellt, um die möglichen Energie- und Investitionskosten senkungen darzustellen. Dieses Beispiel bezieht sich auf zwei Zonen einer Bank. Diese Zonen sind Büros wie in Bild 7 dargestellt. Dieses Projekt war ein Altbauerneuerungsprojekt, wofür folgende Versionen simuliert wurden:

#### Ist-Version

Bestehendes mittelschweres Gebäude ohne Wärmedämmung, Innentemperatur 21 °C im Winter, 20 bis 28 °C im Sommer, Absenktemperatur 15 bis

17 °C im Winter, versorgt mit Zweikanal-HD-Anlagen

#### Version A

Gebäude wird wärmegeklämmt, Luftmengen und Anlagengrößen werden entsprechend angepaßt

#### Version B

wie Version A zuzüglich Anheben der Nachtabenkung auf 19 °C

#### Version C

wie Version B zuzüglich lastabhängig geregelter Kalt- und Warmlufttemperaturen mit entsprechender Größenanpassung.

*Bild 8* zeigt den jährlichen Verbrauch an Gas und Strom für diese zugehörigen Komponenten. Version A führt erstmals zur stärksten Reduktion des Energieverbrauches. Version B erhöht den Energieverbrauch, bedingt durch die geringere Absenkttemperatur, um ein Geringfügiges. Jedoch sind die thermischen Komfortbedingungen erheblich günstiger, wie aus den *Bildern 9* und *10* entnommen werden kann.

Werden die Fahrensweisen der Anlagen weiterhin verbessert und die Größe der Zentrale weiter reduziert, beträgt der Gesamtenergieverbrauch (Gas und Strom) für Version C 30 000 kWh gegenüber 46 000 kWh für Version A und 102 000 kWh für die Ausgangsversion. Dies stellt eine mögliche Energieeinsparung von 71% von der Ausgangssituation und 36% von der Version B dar. Zur gleichen Zeit werden die Kessel/Kältemaschinengrößen um 70/64% von der Ausgangssituation und 40/33% von der Version B reduziert (s. *Tabelle*).

### **Zusammenfassung**

Die dynamischen Lasten, die aus den wechselnden Bedingungen eines Gebäudes hervorgehen, können stark die thermischen Komfortbedingungen, die erforderlichen Anlagengrößen und den gesamten Energiebedarf beeinflussen. Eine Auslegungsmethode wurde hier vorgestellt, die es dem Planer erlaubt, Systeme und Regelstrategien bzw. Fahrensweisen zu optimieren, um die Spitzenlasten so weit wie möglich zu senken und aus der thermischen Trägheit des Gebäudes zu profitie-

ren. Die Reduktion der Spitzen erhöht das thermische Komfortverhalten und erniedrigt die erforderliche Komponentengröße. Zuzüglich ist die Beschwerderate in Gebäuden, die solchermaßen optimiert werden, sehr niedrig.

Die Anlagengrößen für diese Systeme sind typischerweise 30 bis 50% kleiner als für konventionell ausgelegte Systeme. Die kleineren Komponenten arbeiten zwar über einen längeren Zeitraum, jedoch in einem niedrigeren Teillastbereich, der den gesamten Wirkungsgrad erhöht. Der Bauherr hat zusätzlich niedrigere Investitionskosten für kleinere Anlagen zu tragen.

Diese Vorgehensweise wurde durch den Einsatz von Gebäude-Simulationsprogrammen ermöglicht, die über einen gesamten Jahresverlauf mit ausreichender Genauigkeit das thermisch dynamische Verhalten des Gebäudes ermitteln. Diese Werkzeuge geben dem Planer Informationen über das Gebäude, die mit einfacheren Berechnungsmethoden nicht gewonnen werden können. Es ist wichtig, daß solche Werkzeuge Stand der Technik in zukünftigen Auslegungen werden. [H 183]