

PROF. DR.-ING. HABIL. LOTHAR ROUVEL

FACHGEBIET ENERGIETECHNIK UND -VERSORGUNG · THERMISCHE GEBÄUDESIMULATION



SÄULINGSTRASSE 4  
80686 MÜNCHEN

TEL.: 089-576804  
FAX: 089-5706641  
ROUVEL@GEBSIMU.DE  
WWW.GEBSIMU.DE

# **Energy Conservation in Buildings and Community Systems**

**International Energy Agency (IEA)**

**ECBCS-Annex I - "Establishment of methodologies  
for load/energy determination of buildings"**

**BMFT Forschungsauftrag ET 5238A**

**Abschlussbericht der Arbeitsgruppe Gebäudeenergiebedarf**

**Veröffentlicht von:**

**LTG Lufttechnische GmbH, Stuttgart in Technische Information Nr. 51**

**Abschlußbericht der Arbeitsgruppe „Gebäudeenergiebedarf“ zum Forschungsauftrag ET 5238 A Energy Conservation in Buildings and Community Systems – IEA – Annex I „Establishment of methodologies for load/energy determination of buildings“**

**Inhaltsübersicht**

- A Allgemeines
- B Arbeitsgruppe „Gebäudeenergiebedarf“
- C Ablauf des Forschungsvorhabens
  - Phase 1 – IEA O A, B, C
  - Phase 2 – AVON-Bank
- D Ergebnisse
  - IEA O A, B, C
  - AVON-Bank
  - Sonderauswertungen
- E Berechnungsverfahren
- F Zusammenfassung

**A Allgemeines**

Anfang 1977 wurde bei der R & D-Abteilung der International Energy Agency (IEA) das Projekt „Comparison of Building Energy Analysis Computer Programs“ mit Teilnehmern aus USA, Großbritannien, Kanada, Schweden, Dänemark, Italien, Niederlande und der Schweiz begonnen. Ziel des Projektes war es, im internationalen Rahmen festzustellen, wie weit die Ergebnisse von etwa 20–30 heute international verfügbaren EDV-Programmen zur Berechnung des Gebäudeenergiebedarfes vergleichbar sind und welche Genauigkeit von diesen Programmen erwartet werden kann. Dies ist als notwendige Voraussetzung für den Einsatz der rechnerischen Simulation als Instrument der Planung von energieökonomischen Gebäuden und ihrer heiz- und raumlufttechnischen Anlagen anzusehen.

Koordinator und technischer Betreuer für das internationale Forschungsvorhaben war das U.S. Department of Energy, das wiederum mit der Durchführung das Ingenieurbüro RPA (Washington, Paris) – im folgenden auch „Operating Agent“ genannt – beauftragte.

**B Arbeitsgruppe „Gebäudeenergiebedarf“**

Im Jahre 1979 entschloß sich die Bundesregierung, sich an dem IEA-Projekt (Annex I) zu beteiligen.

Unter der Federführung der swd software design GmbH als Koordinator schlossen sich

Klimasystemtechnik Esdorn Jahn Ingenieurgesellschaft mbH, Berlin  
 LTG Lufttechnische GmbH, Stuttgart  
 Prof. Dr.-Ing. H. Schaefer, Prof. Dr.-Ing. L. Rouvel, München  
 swd software design Gesellschaft mbH, Frankfurt/Main

zur ARGE „Gebäudeenergiebedarf“ zusammen, um im Rahmen eines Forschungsauftrages des BMFT (ET 5238 A) einerseits die deutschen Kenntnisse in den internationalen Gedanken- und Erfahrungsaustausch einzubringen, andererseits den Stand der Technik der in der Bundesrepublik Deutschland vorhandenen Programmsysteme einem internationalen Vergleich zu unterziehen.

**C Ablauf des Forschungsvorhabens**

Die weltweit vorhandenen Programme für die Haustechnik unterscheiden sich bedeutend hinsichtlich der Zielrichtung und Leistungsfähigkeit, vor allem bezüglich der physikalischen Grundlagen, der berücksichtigten Einflußgrößen und damit in ihrer prinzipiellen Eignung und der erzielbaren Genauigkeit. Die Ergebnisse der ersten Vergleichsrechnungen – noch ohne deutsche Beteiligung – im Rahmen des IEA-Projektes waren bis zum Faktor 10 unterschiedlich.

**Phase 1 – IEA O A, B, C**

Um die Ursachen für diese beträchtlichen Divergenzen bestimmen zu können und um unterschiedliche Ergebnisse aufgrund von andersartiger Interpretation der Aufgabenstellung zu eliminieren, wurde unter der Bezeichnung IEA O ein vereinfachtes „Standard Test Building“

definiert und einheitliche meteorologische Randbedingungen in Form eines Test-Referenzjahres (TRY-WEATHERS-FIELD) festgelegt. Ebenso wurde ein von allen Teilnehmern zu benutzender Algorithmus, die „BERLAG-Subroutine“, zur Berechnung von Diffus- und Direktstrahlung aus den Meßwerten der Globalstrahlung vorgegeben.

Sozusagen mit aufsteigendem Schwierigkeitsgrad wurden folgende drei Fälle eines idealisierten 12-geschossigen Gebäudes mit Standort nahe London untersucht (s. Ansichten des Gebäudes, Bild 1 und 2):

IEA O A: Thermische Belastung des Gebäudes nur durch Außenwandflächen (Fenster durch Wandflächen ersetzt)

IEA O B: Thermische Belastung des Gebäudes durch Außenwandflächen und durch Fenster (Strahlungsgewinn)

IEA O C: Wie Fall B, jedoch zusätzliche innere Lasten durch Beleuchtung und Personen

Die Rechenläufe wurden für einen Sommer- und Wintertag jeweils im eingeschwungenen Zustand und für die Jahresperiode (8760 Stunden) ausgeführt. Die Raumtemperatur wurde über sämtliche Jahresstunden als konstant vorausgesetzt, was einem durchgehenden Klimaanlagenbetrieb entspricht. Die Ergebnisse wurden auf einheitlichen Formblättern verdichtet und zusammengestellt, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse im internationalen Rahmen zu gewährleisten. Die Ergebnisse wurden von RPA quantitativ und qualitativ ausgewertet und im Abschlußbericht vom Mai 1980 unter Einarbeitung der Ergebnisse der deutschen Teilnehmer, die bis März ihre Rechenläufe fertiggestellt hatten, zusammenfassend veröffentlicht.

Es erübrigt sich an dieser Stelle, auf die Vorgaben und das Analyseverfahren im einzelnen einzugehen. Hierzu sei auf Anhang VI des vollständigen Berichtes bei der PLE verwiesen.

Bild 1: IEA O Gebäude, Westansicht

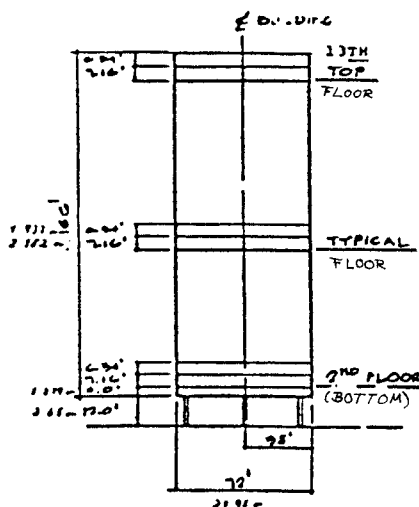
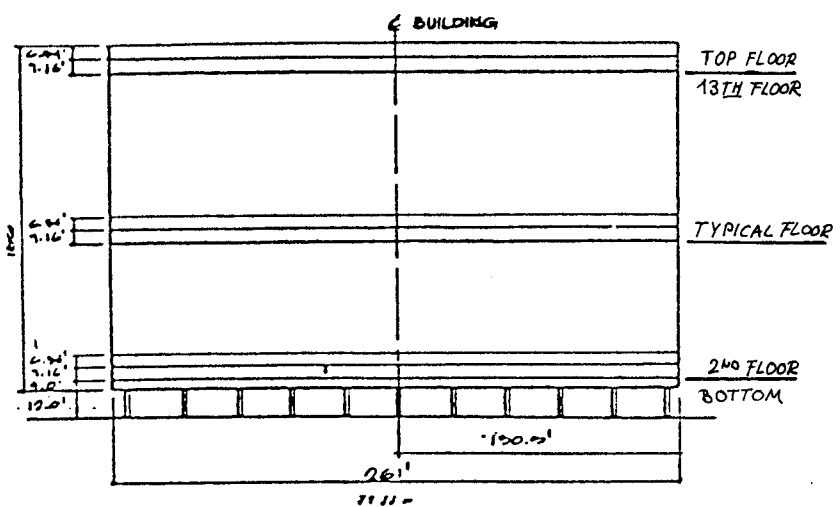


Bild 2: IEA O Gebäude, Nordansicht



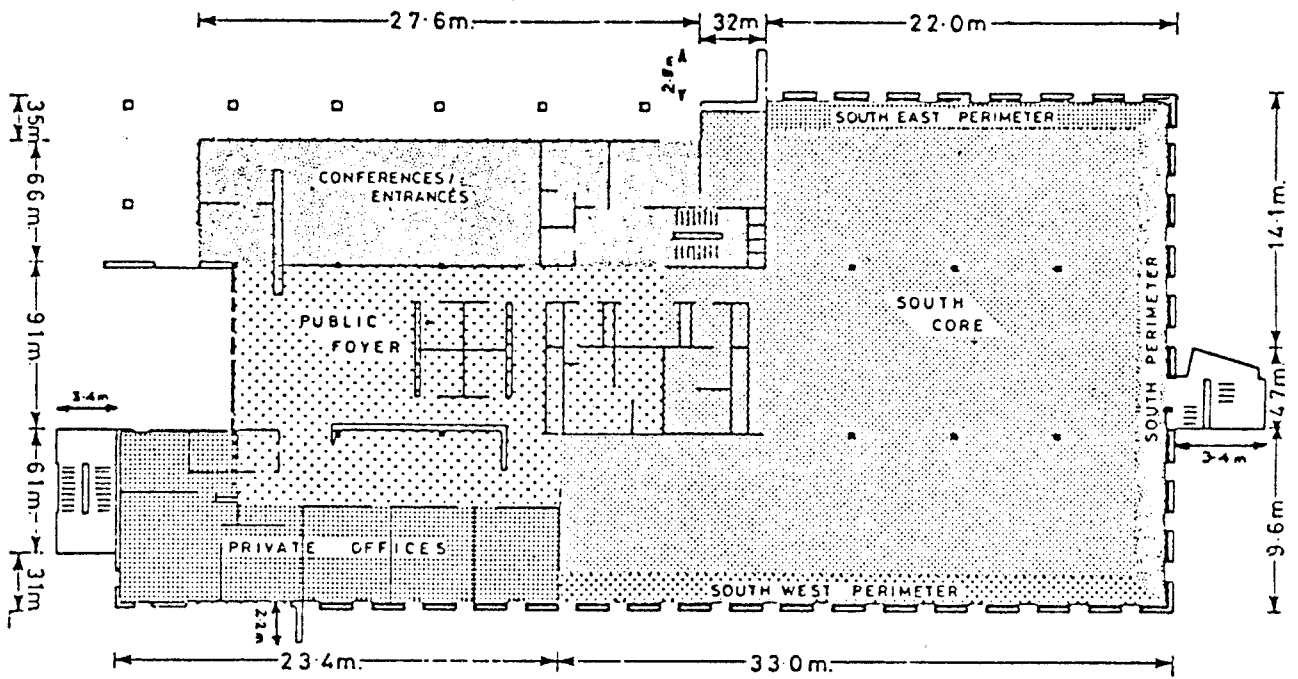


Bild 3: AVON-Bank-Gebäude, Grundriß

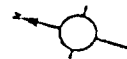
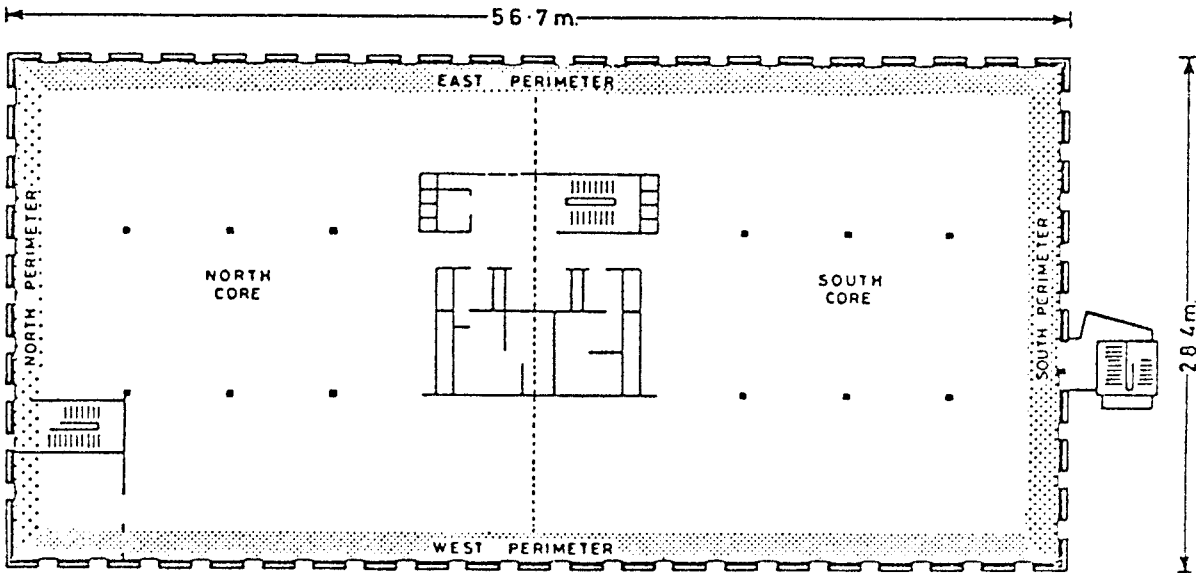


Bild 4: AVON-Bank-Gebäude, 1. und 2. Obergeschoß

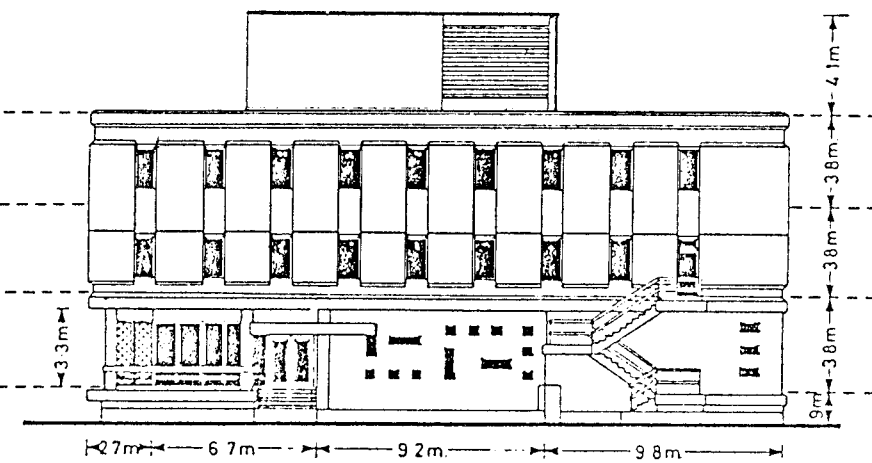


Bild 5: AVON-Bank-Gebäude, Nordansicht

Bild 6: AVON-Bank-Gebäude, Südansicht

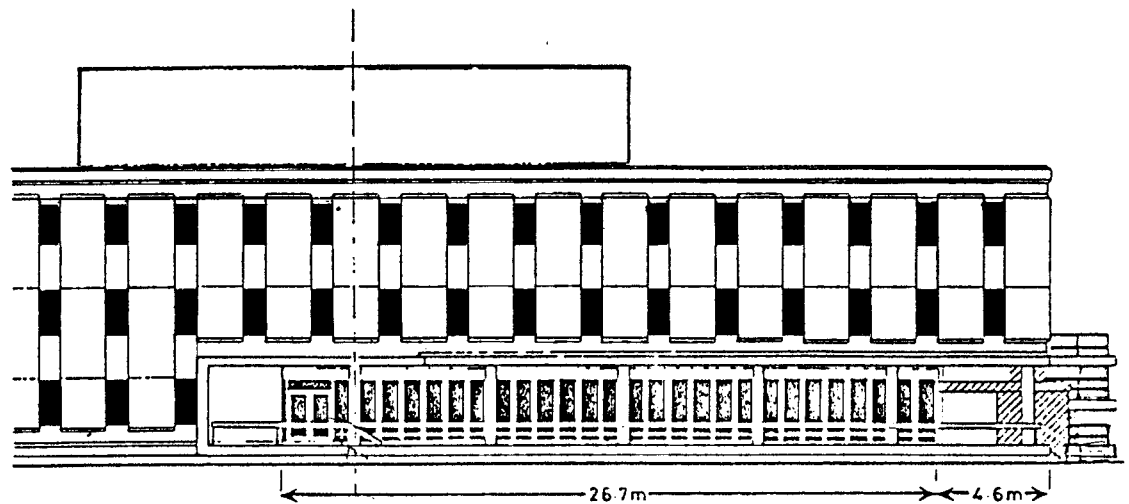
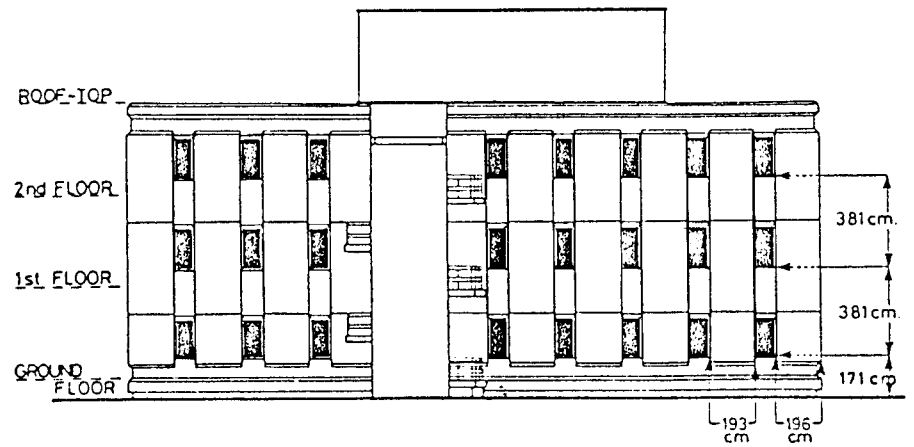


Bild 7: AVON-Bank, Ostansicht (nördliches Ende) und Fassadendetail

**Phase 2 – AVON-Bank**

In der zweiten Phase des Forschungsvorhabens wurde für zwei vierzehntägige Zeiträume im Januar 1973 und im Juli 1973 die realistische Betriebsweise eines Verwaltungsgebäudes (AVON-Bank, Bristol) nachgebildet – mit allen Besonderheiten der Belegungs- und Beleuchtungsprofile, der Anlagenbetriebszeiten (hier 12 Stunden pro Tag mit Wochenendschaltung) sowie der lufttechnischen Versorgung für die einzelnen Gebäudezonen. Für diese Perioden lagen umfassende Messungen im Gebäude, detailliert ausgewertet, vor, so daß sich hier nicht nur ein Vergleich der Programme untereinander durchführen, sondern auch die Übereinstimmung der von den Programmen prognostizierten Ergebnisse mit den Messungen des realen Betriebes überprüfen läßt. Die Ergebnisse der Rechenläufe wurden, wie schon bei dem IEA O-Gebäude, in einheitlicher Form dargestellt und damit vergleichbar gemacht.

Einen Eindruck von dem AVON-Bank-Gebäude geben die folgenden Bilder 3 bis 9.

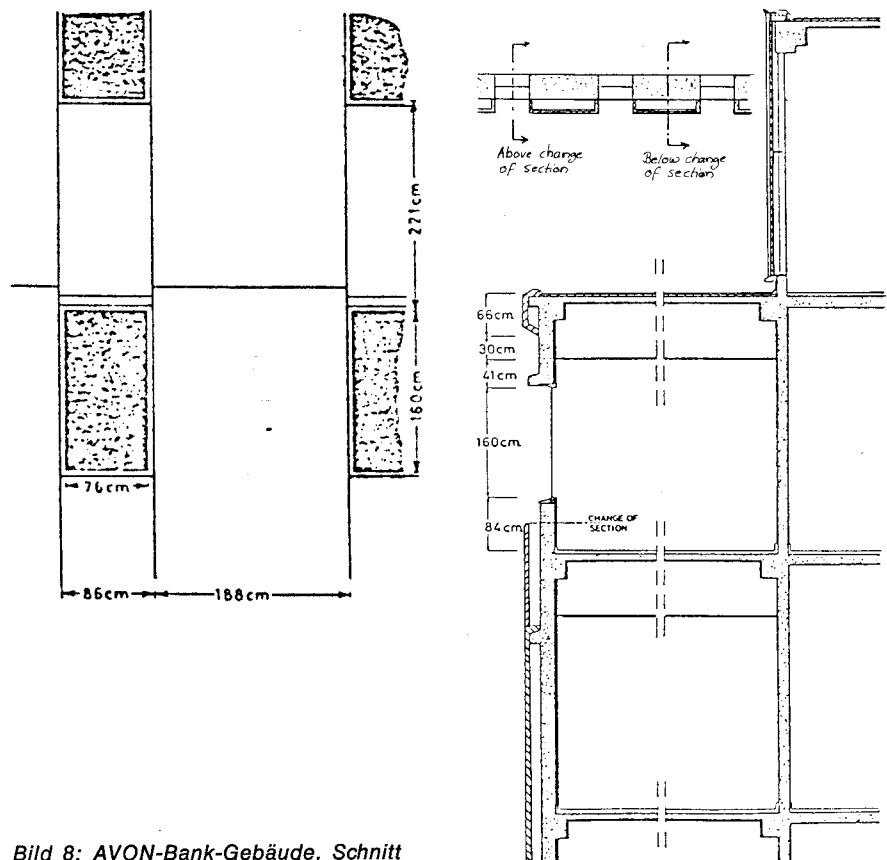


Bild 8: AVON-Bank-Gebäude, Schnitt

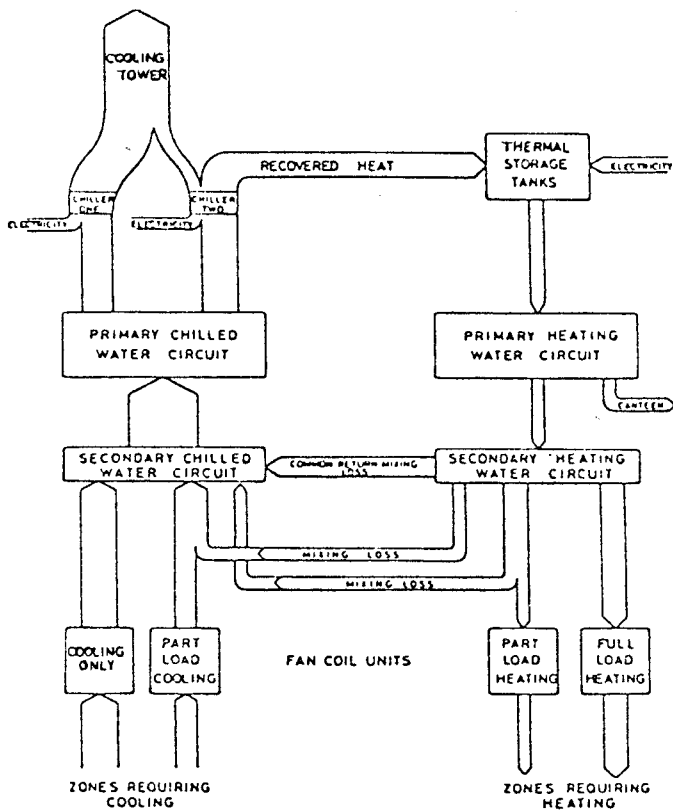
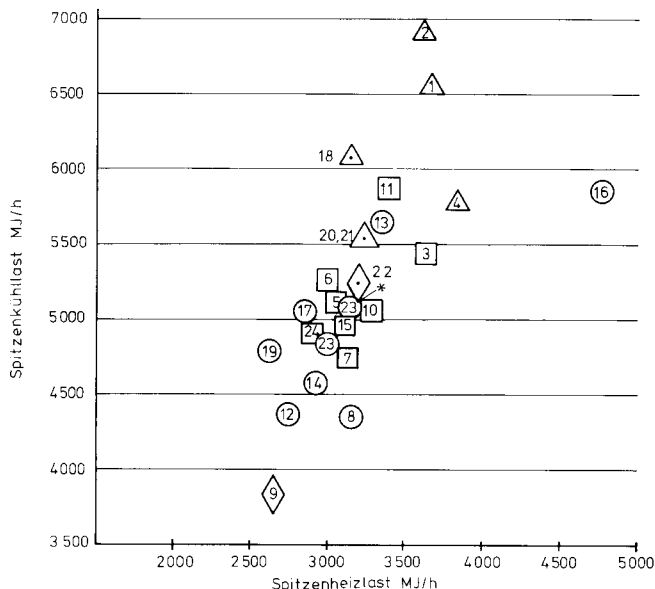


Bild 9: AVON-Bank-Gebäude, Energiefluß-Diagramm

Bild 10: Spitzenlasten für Wärmebedarf und Kühllast der verschiedenen Programme (man beachte, daß der Koordinatenursprung nicht im Nullpunkt liegt).



Legende zu den Bildern 10 und 12:

1 Ecube 75	9 ECRC	17 HTB
2 Esa/Meriwether	10 Faber	18 LPB-1
3 HVAC 5	11 Atkool	19 Prometheus 2
4 Pilkington	12 BA 4	20 LTG EN 2T
5 DOE-1	13 ESP (Abacus)	21 LTG EN 3T
6 Scout	14 Julotta	22 JAEN
7 Reid	15 WTE-01	23 RO 101 T
8 Therm	16 Airnet	24 LTG ENTRY

Methode zur Behandlung von Speichereffekten:

Vereinfacht	△
Standardisierte Übertragungsfunktion	□
Detaillierte numerische Lösung	○
Unbekannt	◇

\* Ergebnisse RO 101 T (23 = \*) wurden gegenüber den Angaben des IEA-Abschlußberichtes aufgrund einer Neurechnung korrigiert. In Bild 10 und 12 wurden beide Ergebnisse aufgeführt.

## D Ergebnisse

### D1 IEA O, A, B, C

Im folgenden sind die Ergebnisse der Rechenläufe der deutschen Teilnehmer zusammen mit den internationalen Ergebnissen, wie sie von RPA ausgewertet wurden, kurz dargestellt. Für Einzelheiten sei auf die ausführlichen Abschlußberichte der ARGE-Partner in den Anhängen verwiesen.

Bild 10 zeigt die berechneten Spitzenlasten (Heizen, Kühlen) der verschiedenen Programme für das IEA O C-Gebäude, die während des simulierten Jahresbetriebes auftreten. Man erkennt, daß international die Ergebnisse rund um den Faktor 2 differieren, während die Ergebnisse der deutschen Teilnehmer recht eng beieinanderliegen (Streuung rund 20 %).

Die insgesamt große Schwankungsbreite ist einmal durch verschiedene Modellansätze der Programme mit unterschiedlicher Leistungsfähigkeit zu erklären – so liefert eine zu grobe Abschätzung der Gebäudewärmespeicherfähigkeit (ursprüngliches älteres ASHRAE-Verfahren (1967)) oder gar die Vernachlässigung der Speichereffekte signifikant höhere Auslegungswerte insbesondere für die Kühlung. Zum anderen dürften auch Programmfehler für die „Ausreißer-Ergebnisse“ verantwortlich sein.

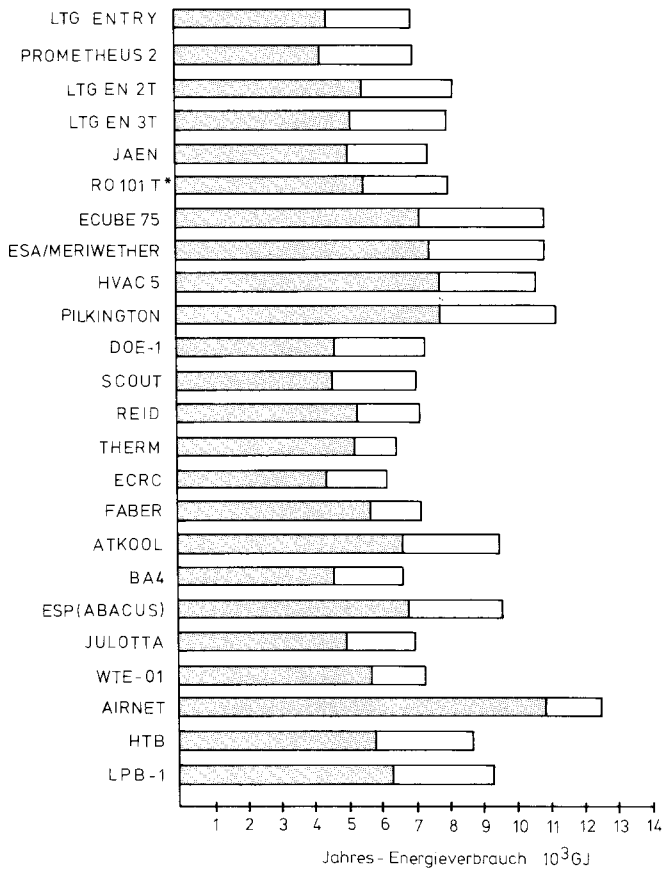
Die Bilder 11 und 12 zeigen die von den Programmen ermittelten Jahresenergieverbräuche, wobei die Wichtung zwischen Wärme und Kälte mit dem Faktor 1 bzw. 0,33 erfolgte, was z. B. dem Fall eines elektrisch beheizten Gebäudes und einer elektrischen Kälteerzeugung mit der Leistungsziffer 3 entsprechen könnte. Auch hier stellt man, wie bei den Spitzenlastangaben, international eine Schwankungsbreite der Ergebnisse von 100 %, bei den deutschen Programmen Unterschiede von 20 % fest.

Obwohl es keinen gemessenen Wert für den jährlichen Wärme- und Kälteverbrauch dieses Modellgebäudes gibt, dürften die deutschen Ergebnisse insgesamt der „Wahrheit“ recht nahe kommen. Jedenfalls liegen sie nahe bei den Werten; die im internationalen Rahmen als von der Methode her fortschrittlich erachteten Programme liefern.

Im Bild 13 ist der Energieverbrauch im Monatsgang, der sozusagen den Wetereinfluß verdeutlicht, dargestellt. Die Programmresultate folgen im großen und ganzen einer einheitlichen Kurvenform, von einigen mehr ausgeprägten „Zacken“ abgesehen.

Es wird deutlich, daß die Programme in der Lage sind, nicht nur für die Jahressummen, sondern auch für ausgewählte Perioden, vernünftige Ergebnisse zu liefern.

**Bild 11: Jahresenergieverbrauchswerte für Heizung und Kühlung des Gebäudes IEA O C**

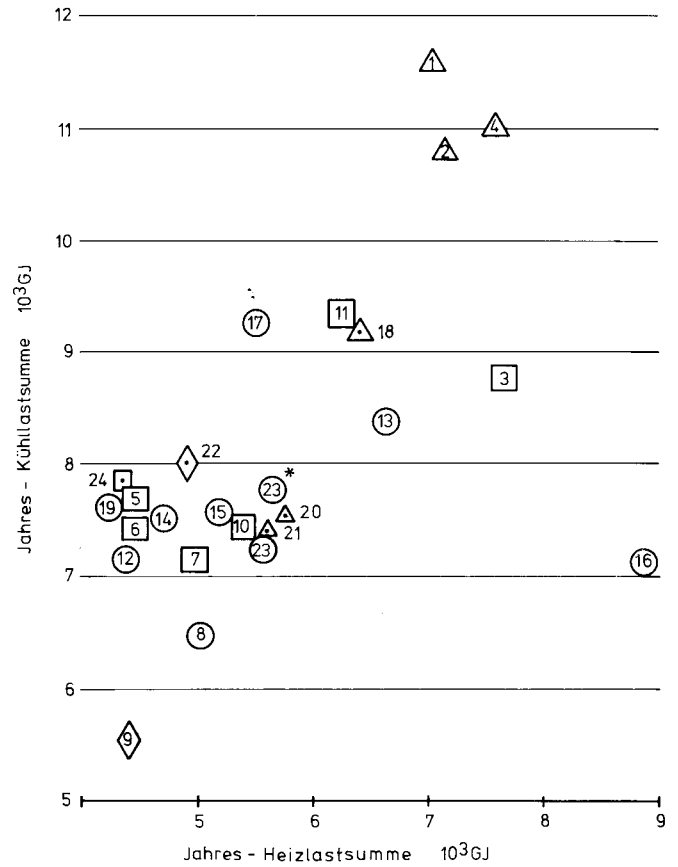


Energieverbrauch für Heizung  
 Energieverbrauch für Kühlung

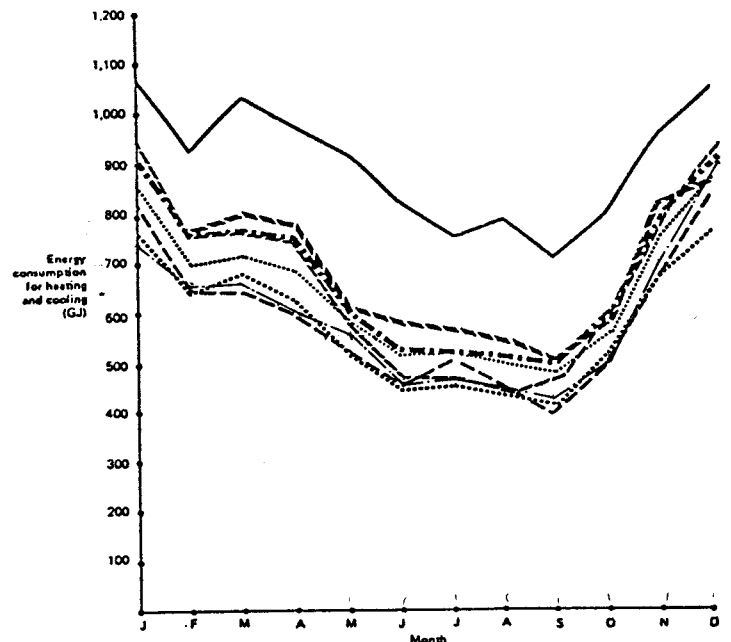
Anmerkung: Der Energieverbrauch basierend auf den Jahressummen der Heiz- und Kühllasten unter der Annahme eines Betriebswirkungsgrades der Wärmeerzeugung von 100 % und einer mittleren Kältemaschinen-Leistungsziffer von 3,0 (Netto-Wärmeverbrauch x 1, Netto-Kälteverbrauch x 0,33),.

\* Ergebnisse RO 101 T (23 = \*) wurden gegenüber den Angaben des IEA-Abschlußberichtes aufgrund einer Neurechnung korrigiert. In Bild 10 und 12 wurden beide Ergebnisse aufgeführt.

**Bild 12: Jahressummen der Heiz- und Kühllasten (Koordinatenursprung nicht im Nullpunkt)**



**Bild 13: Energieverbrauch für Heizung und Kühlung des Gebäudes IEA O C im Monatsgang**



Legende zu Bild 13:

NOTE: Energy consumption based on calculated annual heating and cooling loads, assuming a heating plant efficiency of 100% and a chiller plant C.O.P. of 3,0.

- ESA (simplified technique)
- - - DOE-1 (predetermined transfer-function technique)
- ..... Prometheus 2
- / — LTG EN 2T
- / — LTG EN 3T
- ..... JAEN
- / — RO 101 T
- / — LTG ENTRY

Anmerkung: Zur Definition des dargestellten Energieverbrauches siehe Bild 11.

## D2 AVON-Bank

An der zweiten Phase des Forschungsvorhabens, den Rechenläufen zum (realen) AVON-Bank-Gebäude und dem Vergleich mit den gemessenen Werten, beteiligten sich international und auch auf deutscher Seite nicht mehr alle die Teilnehmer, die auch die IEA O A-C-Läufe durchgeführt hatten.

Eine Übersicht und Legende für die folgenden Bilder gibt nachstehende Tabelle:

Schlüssel der Programm-Namen (Eigentümer)

Code Letter	Programme Owner
A	Atkins Research and Development
B	Ove Arup and Partners (UK)
C	Abacus (UK)
D	United States Department of Energy
E	EMPA (Switzerland)
F	Faber Computer Operations Ltd.
G	LPB (Belgium)
H	Pilkington Brothers Ltd.
I	Reid Crowther and Partners (Canada)
J	British Gas (UK)
K	TPD-TNO (Holland)
L	Measured

Bild 14 gibt die Ergebnisse der Heiz- und Kühllasten (Tagessummen) inklusive Primärluftbehandlung der deutschen Teilnehmer im Vergleich zu den gemessenen Werten (durchgezogene Kurve M)

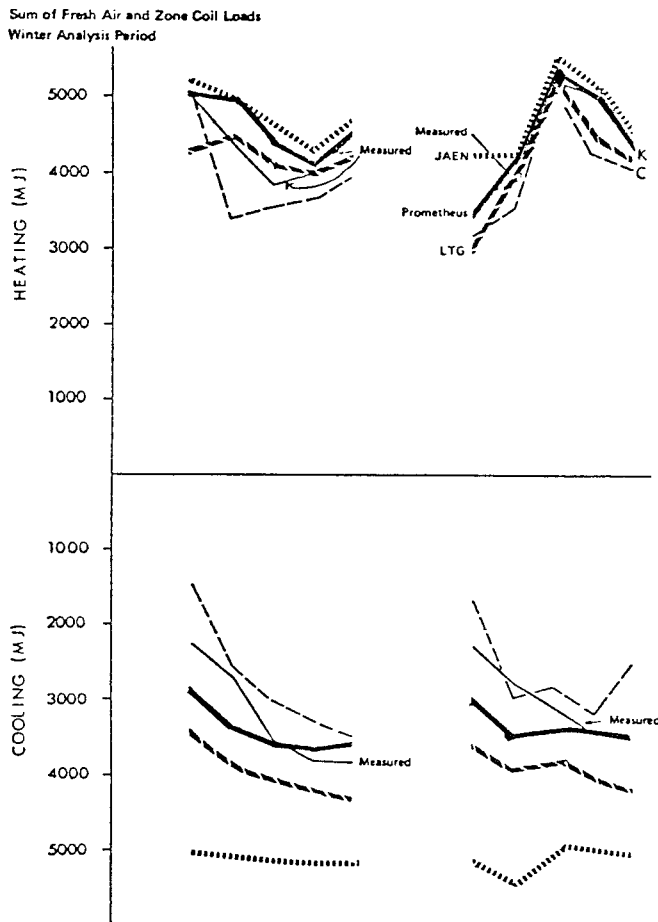


Bild 14: Summe Primärluftbehandlung und sekundärseitig Heiz- und Kühlleistung – Winterperiode

und zu ausgewählten internationalen Teilnehmern für die analysierte Winterperiode 1973 (6. Januar bis 19. Januar) und Bild 15 gibt die Tagessummen der Kühllasten (primär- und sekundärseitig) für die analysierte Sommerperiode (14. Juli bis 27. Juli) wieder.

Bild 16 und Bild 17 zeigen exemplarisch für das 1. Obergeschoß des AVON-Bank-Gebäudes für den Winter- und Sommerfall den 8 bis 18 Uhr-Verlauf der „Heat-Extraction-Rate“, also der aufzubringenden stündlichen Wärme- bzw. Kälteleistung – einschließlich der Lüftungslast durch die unbehandelte Primärluft –, um den Raum (bei unterbrochenem Anlagenbetrieb) während der Nutzungszeit entsprechend den Sollwerten von Raumlufttemperatur und -feuchte und innerhalb der Regeltoleranz auf den gewünschten Zustand zu bringen. Der Vergleich der Kurvenform und die numerische Übereinstimmung von errechneten und gemessenen Werten kann als Maß für die Fähigkeit eines Programmes angesehen werden, den realen Anlagenbetrieb in einem Gebäude „nachzuvollziehen“. Bei den „Meßwerten“ der AVON-Bank muß freilich eingeschränkt werden, daß sie aufgrund der seinerzeit angewandten Meßtechnik wohl mit gewissen Ungenauigkeiten und Fehlern behaftet waren, was verschiedentlich zu Diskussionen Anlaß gab.

Bild 18 gibt den Verlauf der am Kühler des Zentralgerätes anfallenden Primärluftkühlleistung für die vierzehntägige Sommerperiode wieder. Für diesen ein-

fachen Berechnungsfall ist besonders für den zweiten 5-Tage-Abschnitt deutlich zu erkennen, daß zwölf der dreizehn Rechenergebnisse ganz eng zusammenliegen, während die Meßwerte doch deutlich abweichen (ca. 50 % höher). Da physikalische oder Rechenfehler hier auszuschließen sind, kann dies nur als Indiz für Widersprüche der gemessenen Werte zu den Spezifikationen von Gebäude und Anlagen gewertet werden.

Bild 19 schließlich zeigt die Auftragung des Zusammenhangs zwischen Wärme- und Kälteverbrauch in den beiden Analyseperioden. Die eingezeichnete Linie stellt die Regressionsgerade für die Ergebnisse der internationalen Teilnehmer (ohne deutsche Ergebnisse) dar. (Im Originalbericht der RPA sind die Bezeichnungen für Heizung und Kühlung vertauscht.) Das Diagramm samt Regressionsgerade kann (unter gewissen Vorbehalten gegenüber dem Meßwert) vereinfacht wie folgt interpretiert werden:

– Je näher das Ergebnis eines Programmlaufes an M liegt, um so realistischer ist im allgemeinen die Energieverbrauchsrechnung des Programmes. Da bei hier wegen verschiedener Unterschiede zwischen den Vorgaben für die Rechnung und dem realen Anlagenbetrieb der Abstand zwischen M und dem Rechenergebnis jedoch kein absolutes Maß für die Programmqualität. Zum Beispiel enthalten die Meßwerte die durch die Bypass-Regelung der Ventilator-konvektoren bedingte latente Kühlleistung, während diese bei der Rechnung aufgrund der Spezifikation entfallen sollten.

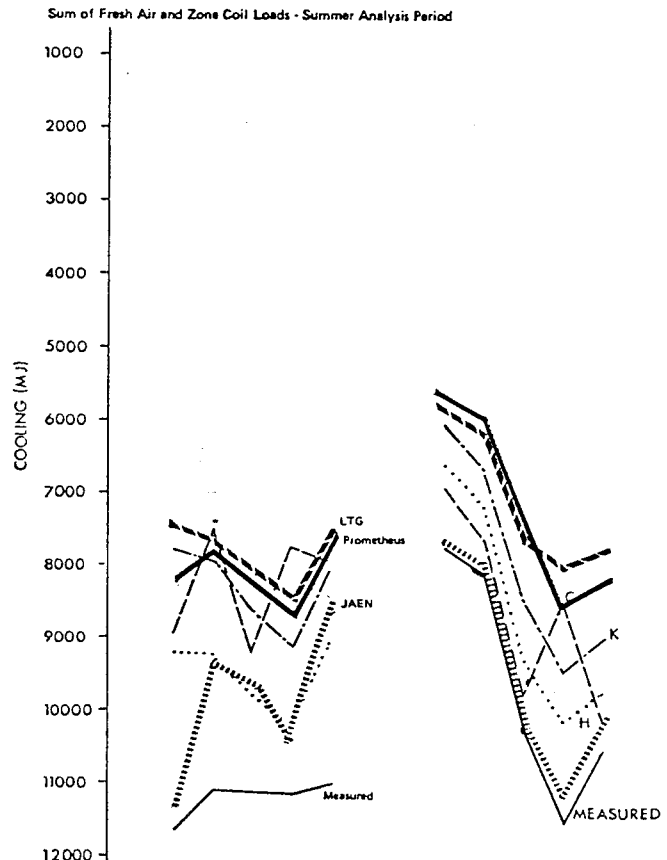
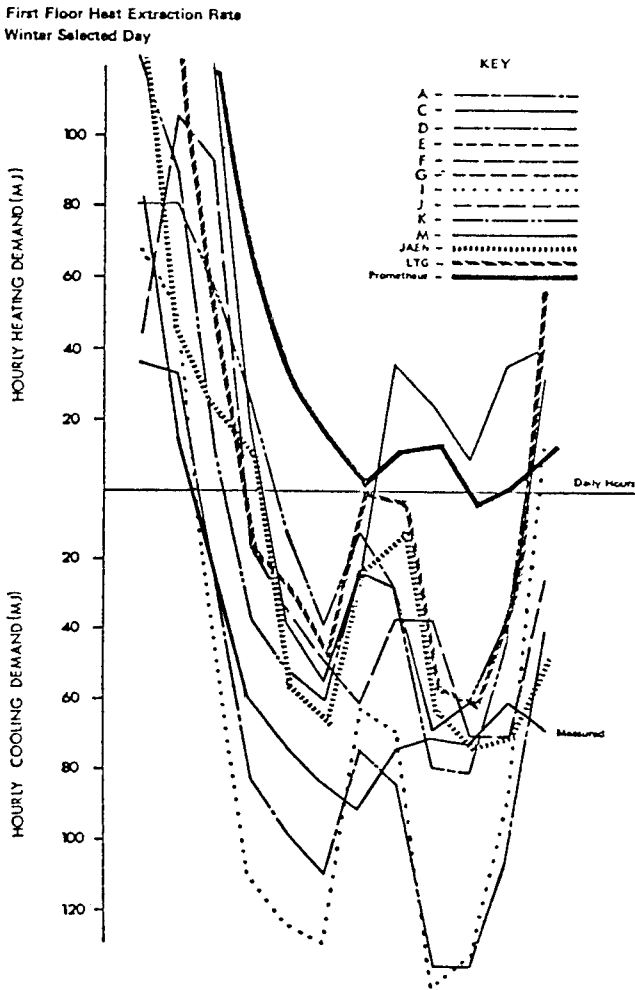


Bild 15: Summe Primärluftbehandlung und sekundärseitig Heiz- und Kühlleistung – Sommerperiode

Bild 16: Summe der stündlichen Heiz- und Kühllasten im 1. Obergeschoß einschließlich der Lüftungslasten durch die unbehandelte Primärluft – Ausgewählter Wintertag



Für die drei deutschen Teilnehmer ist hier die „Zone Load“ der Ergebnisprotokolle aufgetragen.

Sum of Summer and Winter Period Heating and Cooling Demands [Two 2 Week Periods]  
Sum of Fresh Air and Zone Coil Loads

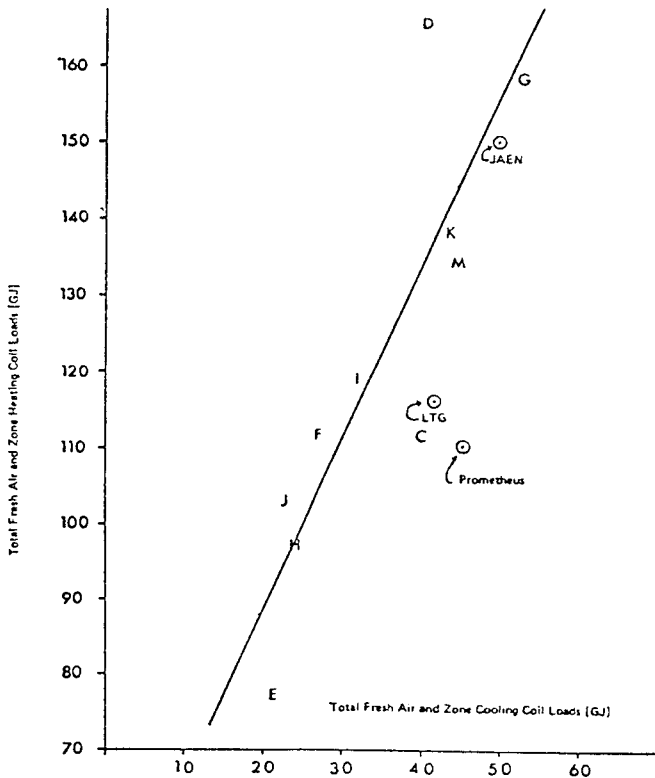
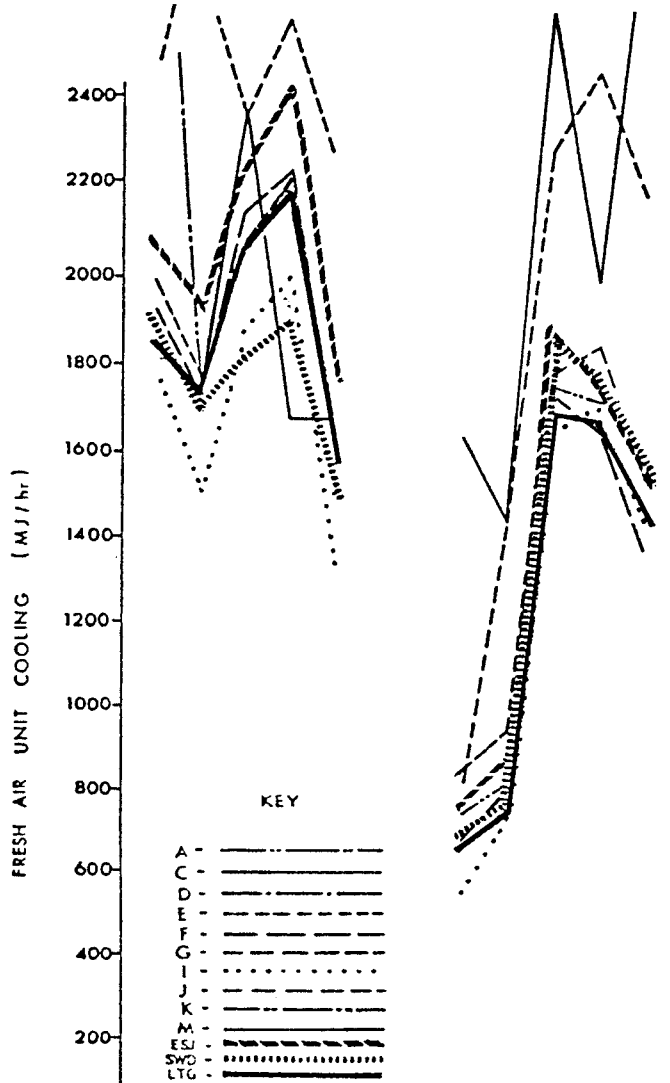


Bild 19: Wärme- und Kälteverbrauchssummen in den Beobachtungsperioden (Ursprung der Ordinate nicht im Nullpunkt)

Bild 18: Kälteleistung für Primärluftkühlung im Zentralgerät – Sommerperiode



Summer Period Daily Cooling on Fresh Air Unit

First Floor Heat Extraction Rate Summer Selected Day

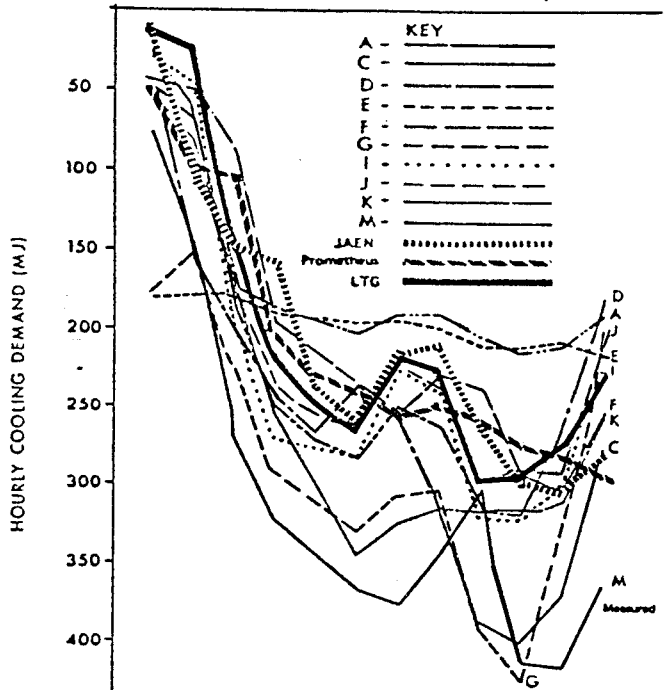
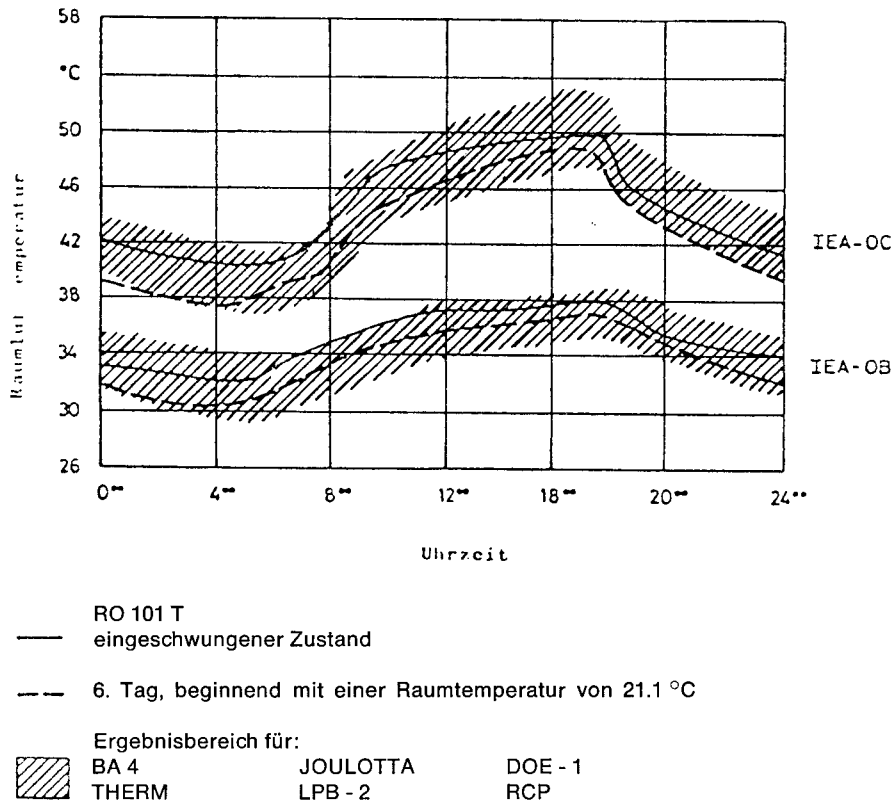


Bild 17: Summe der stündlichen Heiz- und Kühllasten im 1. Obergeschoß einschließlich der Lüftungslasten durch die unbehandelte Primärluft – Ausgewählter Sommertag



Bild 20: Raumlufttemperaturen, ohne Heizen und ohne Kühlen; Gebäude IEA O B und IEA O C; „Repeating Summer Day“ (Darstellung Rouvel)



– Je näher das Ergebnis eines Programmlaufes an der Regressionsgeraden liegt, um so konsistenter ist es mit den Berechnungen und Rechenverfahren der anderen Teilnehmer. Auch hier läßt sich jedoch kein absoluter Maßstab über einen physikalischen „Sinn“ der Regressionsgeraden anlegen. Grundsätzlich würde ein zusätzlich zu den Rechenvorgaben berücksichtigter Luftaustausch zwischen einzelnen Gebäudezonen zu einem zumindest zeitweisen Lastausgleich führen, d. h. zu einer Reduktion von Heiz- und Kühllasten. Ähnlich wirken sich auch Ungenauigkeiten bei der thermischen Beschreibung der Gebäudeaußenhaut aus. Inwieweit sich damit eine Veränderung der Ergebnisse gerade längs oder parallel der Regressionsgeraden ergäbe, ist unklar, doch im Rahmen der üblichen Rechenansätze wahrscheinlich.

In einer Sonderanalyse von Jahn, bei der von ihm die Temperaturentwicklungen und die resultierenden Wärmeströme im Gebäude ohne und mit Luftaustausch untersucht wurden, stellte er fest, daß die dadurch bedingten Wärmetransportvorgänge auch andere Tendenzen hervorrufen können (siehe Abschnitt D 3, Sonderauswertungen insbesondere Bild 22). Er untersuchte dabei auch erheblich höhere Außenluftwechsel als nach der Spezifikation vorgegeben (0,25 bis 1 h<sup>-1</sup> bei Vorgabe 0,25-1). Die Vergleichbarkeit mit den anderen Rechnungen ist dabei nicht mehr gegeben. Die Darstellung gibt jedoch qualitativ einen Anhalt für mögliche Richtungsänderungen bei Veränderung der Berechnungsvoraussetzungen.

Immerhin zeigt sich, daß die Bedeutung des inneren Luftaustausches erheblich geringer ist als die des Außenluftwechsels, und daß dieser Luftaustausch die Berechnungsergebnisse nur bei höher angenommenen Außenluftwechseln erheblich verschiebt.

Insgesamt läßt sich feststellen, daß die internationalen Ergebnisse wiederum um ca. den Faktor 2 schwanken, während die Ergebnisse der drei deutschen Teilnehmer deutlich näher (Streuung rund 20 %) beieinanderliegen. Da die AVON-Bank im Gegensatz zum Gebäude IEA O bedingt durch die sehr großen Betriebsunterbrechungen ein stark nicht lineares System darstellt, ist die Bedeutung der in Bild 19 eingetragenen Regressionsgerade nur schwer zu beurteilen. Auffällig ist jedoch, daß der Meßwert trotz der erwähnten Diskrepanzen zu den Annahmen für die Rechenwerte ebenfalls in der Nähe dieser Geraden liegt. Eine abschließende Interpretation der vorliegenden Ergebnisse konnte auch im internationalen Rahmen nicht gegeben werden. Hier sind aufgrund der notwendigen Limitierung des Projektumfangs eine Reihe von Fragen offen geblieben.

Zonen je Geschoß	1	4 (N, O, S, W)	5 (N, O, S, W, IZ)	
Heizung H	-5711	-5773	-7591	GJ
Kühlung K	7411	7467	9285	GJ
K – H	1700	1694	1694	GJ

Bild 21: Jahresenergiesummen für Heizung und Kühlung IEA O C bei unterschiedlicher Geschoß-Zoneneinteilung (gerechnet mit Programm LTG EN3T)

### D3 Sonderauswertungen

Die Beschäftigung mit der Aufgabenstellung des Forschungsvorhabens hatte den nützlichen Nebeneffekt, daß die Teilnehmer sich mit an die Thematik der Energieverbrauchsberechnung von Gebäuden angrenzenden Fragestellungen

Bild 22: Heizen und Kühlen Winter- und Sommerperioden, AVON-Bank (Darstellung Jahn)

beschäftigten, um zu einer besseren Interpretation der vorliegenden Ergebnisse auch im internationalen Vergleich zu gelangen. ROUVEL (Prof. Schaefer) stellte Zusatzberechnungen zum Temperaturgang in unkonditionierten Räumen für das IEA O-Gebäude an. Siehe hierzu auch Bild 20. Seine Ergebnisse zeigen gute Übereinstimmung mit denen der internationalen Programme.

Die LTG untersuchte den Einfluß der gedanklichen „Zonierung“ des Gebäudes IEA O C auf die Rechenergebnisse. Das Resultat ist in Bild 21 dargestellt. Masuch schreibt dazu: „Das Ergebnis der Berechnungen wird durch die Aufteilung des Geschosses in vier Bereiche kaum verändert. Jede Zone ist so tief, daß ein Wärmeüberschuß der Innenbereiche durch eine Wärmeabfuhr über die Außenhaut recht gut kompensiert wird.“

Ausgleichsvorgänge zwischen den Himmelsrichtungen sind demnach nahezu bedeutungslos. Nimmt man dagegen eine Innenzone hinzu, so steigen Heizung und Kühlung um 30 bzw. 25 % an. Das bedeutet: Wärmeausgleichsvorgänge zwischen Außen- und Innenzonen von Gebäuden können von großem Interesse sein. In einem realen Gebäude wird es daher häufig nicht wirtschaftlich sein, z. B. mittels Wärmepumpenschaltungen verschiedene Himmelsrichtungen miteinander thermisch zu koppeln, da über das Jahr gesehen das Einsparungspotential gering ist. Dagegen ist eine Koppelung von Innen- und Außenzonen vielversprechend und dürfte sich durch die große jährliche Zeitspanne, in der gleichzeitig außen geheizt und innen gekühlt werden muß, sehr schnell amortisieren. In Gebäuden mit großen Innenzonen wäre es sogar anzustreben, diese thermische Koppelung grundsätzlich zu fordern.“

Jahn (Klimasystemtechnik) untersuchte den Einfluß der Annahmen zum Außenluftwechsel und zum Luftaustausch zwischen Innen- und Außenzonen eines Gebäudes am Beispiel AVON-Bank. Bild 22 stellt dar, wie sich zunehmender Außenluftwechsel/innerer Luftaustausch (AUF/LWIN) in einem abnehmenden rechnerischen Kälteverbrauch und in einem zunehmenden Wärmeverbrauch auswirkt. Die Begründung für dies zunächst unerwartete Verhalten ist in Bild 23 zu finden. Außerhalb der Anlagenbetriebszeit – dies ist immerhin 65 % der Gesamtzeit – führt der innere Luftwechsel zu einer deutlichen Verschiebung des Niveaus der Raumtemperaturen. Die Innenzonen werden kälter (sie müssen deshalb in der Anlagenbetriebszeit weniger gekühlt werden) und die Außenzonen werden wärmer (sie haben deshalb über den Tag höhere Transmissionsverluste).

Überlagert ist in Bild 23 diese Erscheinung noch durch die Auswirkung der im Programm PROMETHEUS berücksichtigten Leistungsbegrenzung der Ventilator-konvektoren auf die Raumtemperaturen.

Brendel und Güttler untersuchten den Genauigkeitserfolg der Energieverbrauchsrechnung durch die TRY-Simulation.

Internationale Ergebnisse sowie Variation von AUF/LWIN

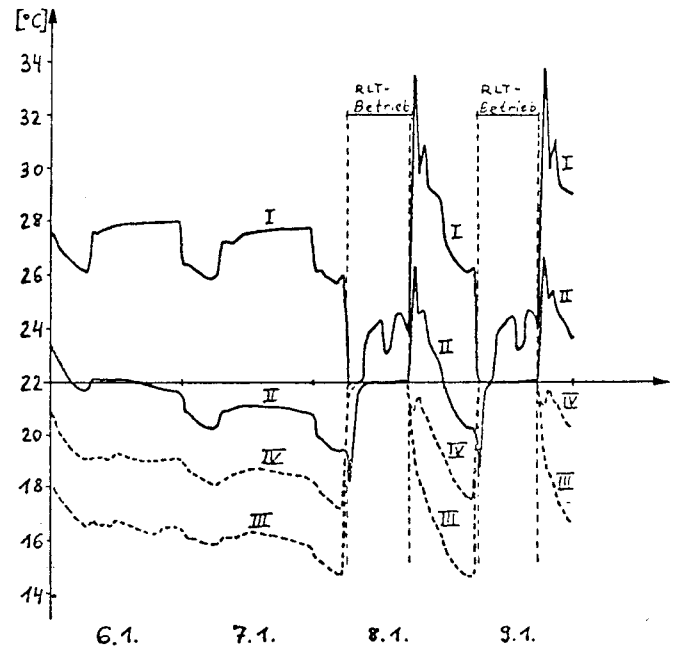
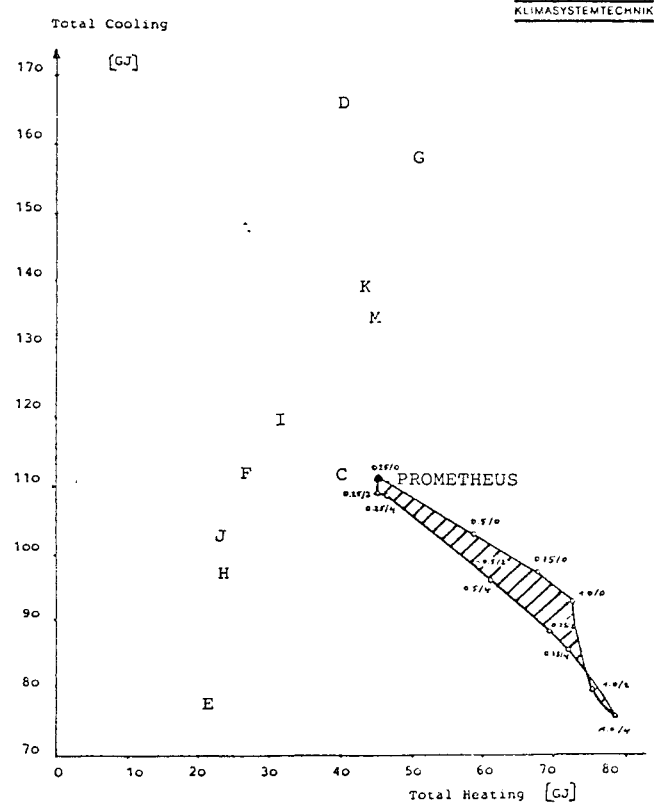


Bild 23: Temperaturverläufe für eine Außenzone und eine Kernzone im 1. Obergeschoß mit und ohne Luftwechsel zwischen diesen Zonen.

Auf das Geschößvolumen bezogen, ist der Außenluftwechsel etwa  $0,25 \text{ h}^{-1}$ , die Summe der inneren Luftwechsel (falls vorhanden) etwa  $2 \text{ h}^{-1}$ .

- I Südlicher Kernraum ohne Luftwechsel
- II Südlicher Kernraum mit inneren Luftwechseln
- III Südliche Randzone ohne innere Luftwechsel
- IV Südliche Randzone mit inneren Luftwechseln

In Bild 24 ist das Resultat einer statistischen Auswertung der IEA O C-Gebäude-Ergebnisse als Funktion der in der Simulation berücksichtigten Tage aufgetragen. Man erkennt, daß mit höherer „Ordnung“, also weniger in die Berechnung einbezogenen Tagen (Ordnung 10 bedeutet, daß nur jeder 10. Tag, also insgesamt 36 Tage pro Jahr, in die Berechnung eingehen), die Abweichungen zwar von der 8760 Stunden-Simulation zunehmen. Die Abweichungen liegen aber bei der Ordnung 10 (was einem Referenztagesverfahren wie z. B. dem der DIN 4710 mit 36 Tagen pro Jahr entspricht) in der Größenordnung von 2–5 %, so daß der Aufwand des TRY hier kaum gerechtfertigt erscheint. Es gilt um so mehr, als bei dieser Analyse die einbezogenen Tage nicht „intelligent“ (wie z. B. in der DIN 4710), sondern rein statistisch ausgewählt wurden.

Bild 25 zeigt die Streuung der maximalen Abweichungen um den TRY-Wert. Man erkennt, daß der „Fehler“ durch Berücksichtigung von nur 10 zufällig ausgewählten Tagen pro Jahr ( $n = 30$ ) weitaus geringer ist als die systematisch, d. h. algorithmisch bedingten Abweichungen z. B. durch vereinfachte Abbildung des Gebäudes und seines Speicherhaltens im Programm.

## E Berechnungsverfahren

Die zur Berechnung des Gebäudeenergiebedarfes verwendeten Verfahren können je nach Anforderung sehr unterschiedlich sein. Man kann sie z. B. nach der Verwendung der meteorologischen Randbedingungen unterscheiden in

- A1 Summenhäufigkeitsverfahren
- A2 Einzelhäufigkeitsverfahren
- A3 Tagesgangverfahren
- A4 Referenzjahr-Verfahren (TRY-Verfahren)

Entsprechend der Art, wie sie die thermische Gebäudedynamik berücksichtigen, kann man unterscheiden in

- B1 stationäre Rechnung
- B2 periodisch eingeschwingene instationäre Rechnung
- B3 voll instationäre Rechnung

Die technischen Anlagen werden bei allen Programmen mit genügender Genauigkeit quasi stationär gerechnet. Die instationären Berechnungsverfahren für das Gebäude kann man noch nach den verwendeten Methoden unterscheiden in

- C1 Verwendung von tabellierten „Speicherfaktoren“
- C2 Verfahren mit „thermischen Ersatzmodellen“
- C3 Verwendung von „Gewichtsfaktoren“ (tabelliert oder speziell berechnet)
- C4 „direkte numerische Lösung“ des Differentialgleichungssystems

Die genannten Merkmale sollten in einem Berechnungsverfahren natürlich nur sinnvoll miteinander kombiniert werden. Jedes Berechnungsverfahren aus

einer sinnvollen Kombination der obigen Methoden hat seine Berechtigung und liefert bei richtiger Anwendung hinreichend genaue Ergebnisse. So ist es z. B. ausreichend, wenn in einem Gebäude und seinen technischen Anlagen die thermische Speicherfähigkeit keine Bedeutung für den Energiebedarf hat, mit einem Einzel- oder Summenhäufigkeitsverfahren (A1, A2) und mit stationärer Rechnung (B1) zu arbeiten. Andererseits ist es sinnvoll, auch in diesen Fällen auf das Tagesgang- oder Testreferenzjahr-Verfahren (A3, A4) überzugehen, wenn eine mehr als zweidimensionale Klassierung der meteorologischen Parameter notwendig wird. Bei Untersuchungen, in denen die thermische Dynamik nur innerhalb der Tagesperiode eine Rolle spielt, liefert wiederum das Tagesgangverfahren (A3) völlig hinreichende Ergebnisse. Dies ist z. B. bei klimatisierten Gebäuden, insbesondere bei durchgehender Anlagenbetriebszeit, der Fall.

Beeinflußt jedoch die thermische Speicherfähigkeit über die Tagesperiode hinaus den Energiebedarf, wird man auf das TRY-Verfahren (A4) übergehen. Solche Fälle liegen z. B. vor bei sehr schweren Gebäuden, bei mittelschweren Gebäuden und sehr starken Betriebsunterbrechungen, bei freischwingender Raumtemperatur und bei Anlagen-Systemen mit Mehrtages speichern.

Die von den deutschen Teilnehmern verwendeten Rechenprogramme arbeiten alle unterschiedlich:

Das Programm JAEN (swd, Frankfurt) arbeitet nach dem Tagesgangverfahren (A3) und je nach Problemstellung mit einem thermischen Ersatzmodell (C2), alternativ auch mit direkter numerischer Lösung (C4), im periodisch eingeschwingenen Zustand (B2) oder auch rein instationär (B3).

Das Programm RO 101 T (Prof. Rouvel/Prof. Schaefer, München) arbeitet nach dem Tagesgangverfahren (A3) und einem thermischen Ersatzmodell (C2) mit voll instationärer Rechnung (B3), d. h. es wird für jeden typischen Tag eine Anlaufrechnung durchgeführt. Für die Untersuchung des Gebäudes IEA O wurde auf das TRY-Verfahren (A4) umgestellt.

Das Programm LTG EN 2T und 3T arbeitet nach dem Tagesgangverfahren (A3) mit zwei und drei typischen Tagen im Monat und Speicherfaktoren (C1) im periodisch eingeschwingenen Zustand (B2). Für das Gebäude IEA O wurden dann aus dem TRY-WEATHERSFIELD vorab typische Tagesgänge für die Monate ermittelt. Für das AVON-Gebäude wurde von der LTG ein neues Programm LTG ENTRY verwendet, welches im TRY-Verfahren (A4) unter Verwendung von tabellierten Gewichtsfaktoren (C3) mit voll instationärer Rechnung (B3) arbeitet. Mit LTG ENTRY wurden auch die Rechnungen IEA O wiederholt (siehe Ergebniszusammenstellung).

Das Programm PROMETHEUS (Klimasystemtechnik, Berlin) arbeitet nach dem TRY-Verfahren (A4) unter Verwendung von berechneten Gewichtsfaktoren (C3) mit voll instationärer Rechnung (B3).

Die Ergebnisse der deutschen Teilnehmer für das Gebäude IEA O und die AVON-Bank zeigen, daß trotz der unterschiedlichen Berechnungsverfahren die Ergebnisse gut übereinstimmen. Die geringe Bedeutung der Meteorologie für das untersuchte Gebäude IEA O wird durch die Sonderuntersuchung der swd bestätigt. Es zeigt sich, daß die aufwendigere Bestimmung der Jahresenergiesummen durch die Simulation von Gebäude und Anlage unter möglichst realistischen Randbedingungen, d. h. für eine typische Außenwitterung über sämtliche 8760 Stunden eines Jahres, nicht immer notwendig ist, um zu hinreichend genauen Ergebnissen zu kommen. (Ein Hauptaugenmerk sollte jedoch auf der „Modellierung“ des Gebäudes liegen.) In einer sehr großen Zahl von Fällen werden vereinfachende Verfahren mit geringerem Aufwand völlig ausreichen. Ziel künftiger Forschungsarbeit muß es sein, detaillierte Vergleiche von Messung und Rechnung zu fördern und weitere vereinfachende Verfahren zu entwickeln und in ihrem Anwendungsbereich abzusichern.

## F Zusammenfassung

Das Forschungsvorhaben, seine Zielsetzung und seine Abwicklung im internationalen Rahmen, wurde von der Seite der deutschen Teilnehmer sehr positiv beurteilt. Der wesentliche Nutzen aus der internationalen Zusammenarbeit auf diesem Gebiet wurde darin gesehen, daß der technische Standard und die Leistungsfähigkeit einzelner Programme auf nationaler und internationaler Ebene festgestellt werden konnte.

Ein wichtiges Ergebnis resultiert aus der erstmals vorgenommenen Trennung der Einflußfaktoren „Meteorologie“ und „Sonstige“ aus der sich ergab, daß die Tagesgangverfahren in vielen Fällen eine ausreichend genaue Simulation der energetisch relevanten meteorologischen Wirklichkeit ergeben, daß Ungenauigkeiten bei der Witterungsbeschreibung offenbar geringer zu bewerten sind als die sonstige Gebäudemodellierung, insbesondere die Nachbildung der Wärmespeichereigenschaften. Diese Erkenntnis, welche verschiedene früher vorgenommene Genauigkeitsabschätzungen (durchgeführt für die Luftaufbereitung als Vergleich Einzelhäufigkeit-Tagesgang sowie insgesamt durch Variation der Zahl der Tage, z. B. 2T, 3T) unterstreicht, wird dazu beigetragen, den Rechenaufwand für energetische Analysen in wirtschaftlich vertretbaren Grenzen zu halten.

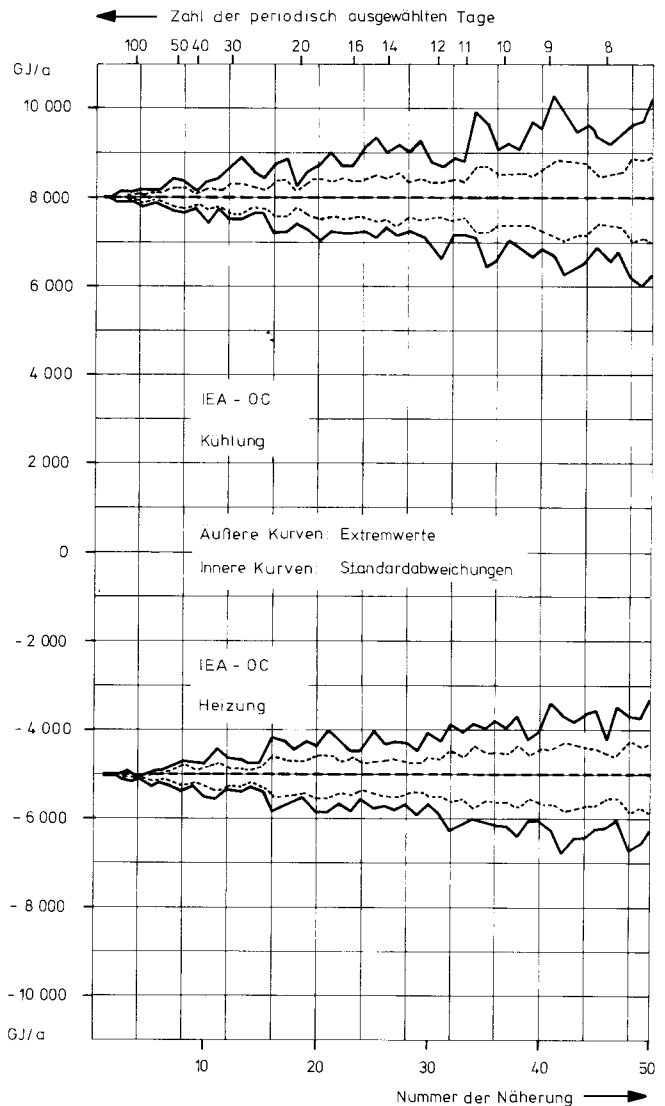
Der wichtigste Erfolg des Vorhabens für die deutschen Teilnehmer lag in der gewonnenen Kenntnis des technischen Standards ihrer Programme im internationalen Vergleich, wobei sich herausstellte, daß die deutschen Programme offensichtlich einen guten bis sehr guten Stand repräsentieren. Eine weitere wichtige Erkenntnis war die Tatsache, daß die Ergebnisse der Computerberechnungen teilweise gute Übereinstimmung untereinander, aber in einigen Punkten deutliche Divergenzen zu den Meßwerten ausweisen; das zeigt einmal

die Schwierigkeit der Messung von Energieverbräuchen in Gebäuden, zum anderen die Schwierigkeiten einer hinreichend guten analytischen Beschreibung der Gebäude und weist auch darauf hin, welche Bedeutung einer zuverlässigen Verbrauchsüberwachung in der Praxis zukommt.

Das internationale Projekt hat insgesamt zu einer Verbesserung der deutschen Rechenprogramme geführt und nicht zuletzt über die Kommunikation der Analysten auf internationaler Ebene und dem dort gepflegten Gedankenaustausch neue Anregungen gegeben.

Darüber hinaus ist es bedauerlich, aber aus den Erkenntnissen des Forschungsvorhabens verständlich, daß die Untersuchung auf recht abstrakte Gebäude beschränkt bleiben mußte und nicht, wie ursprünglich vorgesehen, vermehrt auf praxisnahe Fälle abgestimmt wurde: Damit haben die Ergebnisse der Programmvergleiche nur bedingt Aussagekraft für die Handhabbarkeit der Programme in der praktischen Gebäudeplanung bzw. Gebäudesanierung. Von dieser Einschränkung abgesehen, war das Projekt für die Zielsetzung, die Leistungsfähigkeit computergestützter Methoden zur energieökonomischen Gebäudeplanung zu erkennen und weiterzuentwickeln, notwendig und nützlich.

Bild 24: Statistische Analysen des TRY-Konzeptes



SWD  
GTHH

PROGRAM 'JAEN'

Legende zu Bild 25:

- 1 Ecube 75
- 2 Esa/Meriwether
- 3 HVAC 5
- 4 Pilkington
- 5 DOE-1
- 6 Scout
- 7 Reid
- 8 Therm
- 9 ECRC
- 10 Faber
- 11 Atkool
- 12 BA 4
- 13 ESP (Abacus)
- 14 Julotta
- 15 WTE-01
- 16 Airnet
- 17 HTB

Methode zur Behandlung von Speichereffekten:

- Vereinfacht △
- Standardisierte Übertragungsfunktion □
- Detaillierte numerische Lösung ○
- Unbekannt ◇

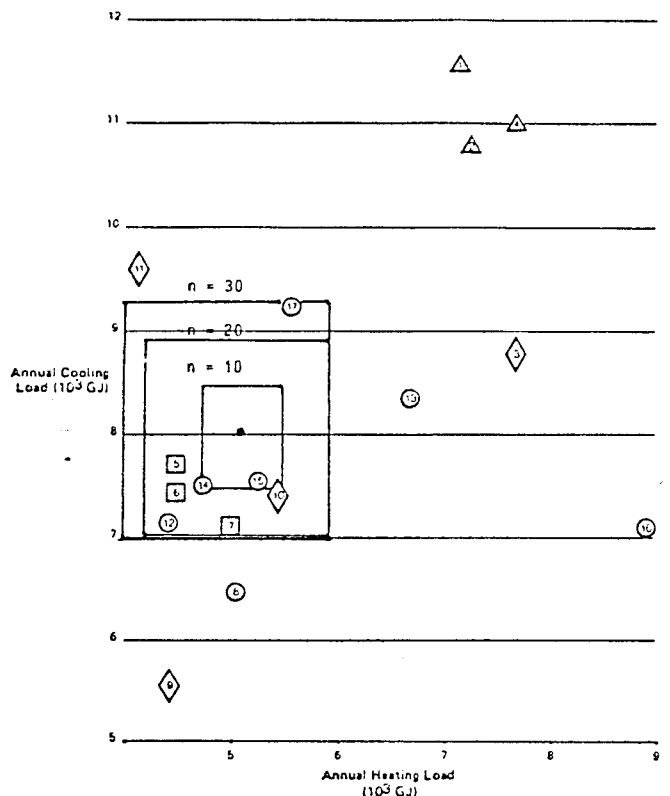


Bild 25: Jährliche Heiz- und Kühllasten für das IEA O C-Gebäude – Bereich der Extremwerte, abhängig von der Ordnung n (Darstellung swd)