

1

# Bauphysik

Wärme · Feuchte · Schall · Brand · Licht · Energie · Klima

31. Jahrgang  
Februar 2009  
Heft 1  
ISSN 0171-5445

A 1879

BauSIM2008  
thermisch-energetische  
und anlagentechnische  
Gebäudesimulation

Ökobilanzen von  
Gebäuden

Thermischer Komfort  
in städtischen  
Außenräumen

Einfluss der Solarstrahlung  
auf das Wärmeempfinden

Komfortmodell für  
inhomogene Umgebung

Webbasierte Wetterdaten  
für Gebäudetechniklasten

Gekoppelte Simulation  
für Heiz- und Kühlkörper

Neues Eingangsgebäude  
auf der Museumsinsel –  
Luftströmungssimulation





Das BMFZ Rostock „enthüllt“ seine Funktion als biomedizinisches und biotechnisches Forschungszentrum durch den amöbenähnlichen Grundriss der Gebäude und die formal wie baustofflich darauf abgestimmte organisch wirkende Außenhülle aus Profilbaugläsern (Deubzer König Architekten, Berlin), siehe Aktuell S. 24.

(Foto: Pilkington Bauglasindustrie)

# Bauphysik

## 1

31. Jahrgang  
Februar 2009  
Heft 1  
ISSN 0171-5445

**Wilhelm Ernst & Sohn**  
Verlag für Architektur und technische  
Wissenschaften GmbH & Co. KG

Rotherstraße 21  
D-10245 Berlin  
Telefon: (030) 4 70 31-200  
Fax: (030) 4 70 31-270  
bauphysik@ernst-und-sohn.de  
www.bauphysik.ernst-und-sohn.de

### peer reviewed journal

Bauphysik ist ab Jahrgang 2007 beim  
„Institute for Scientific Information“ (ISI)  
akkreditiert.

„Bauphysik online“  
die Ergänzung zu „Bauphysik print“

Info anfordern: [marketing@ernst-und-sohn.de](mailto:marketing@ernst-und-sohn.de)  
Stichwort: Bauphysik online (ZS)



### Editorial

- 1 Wolfram Haupt, Anton Maas  
**Welchen Beitrag leistet Gebäudesimulation zum Nachhaltigen Bauen?**

### Fachthemen

- 2 Gunter Pültz, Stefan Barp, Peter Vogel  
**Überlegenheit moderner, innovativer Planungswerkzeuge in der Gebäudeplanung**
- 9 Bastian Wittstock, Stefan Albrecht, Cecilia Makishi Colodel, Jan Paul Lindner  
**Gebäude aus Lebenszyklusperspektive – Ökobilanzen im Bauwesen**
- 18 Lutz Katzschner, Anton Maas, Andrea Schneider  
**Das städtische Mikroklima: Analyse für die Stadt- und Gebäudeplanung**
- 25 Frank Otto  
**Einfluss der vom menschlichen Körper absorbierten Solarstrahlung für das Wärmeempfinden in Gebäuden**
- 38 Rita Streblov, Dirk Müller, Ingo Gores, Peggy Bendfeldt  
**Thermisches Komfortmodell für inhomogene Umgebungsbedingungen**
- 42 Axel Seerig, Carina Sagerschnig  
**Methoden zum Einsatz diskreter, webbasierter Wetterprognosen in Gebäudetechnik und Lastmanagement**
- 51 Ralf Gritzki, Alf Perschk, Wolfgang Richter, Markus Rösler  
**Gekoppelte Simulation zur Spezifikation von Heiz- und Kühlkörpern**

### Rubriken

- 24 Aktuell (s. auch S. 50)  
41 Persönliches  
55 In eigener Sache – Bauphysik bei ISI akkreditiert  
56 Bücher  
57 Veranstaltungen

### Produkte & Objekte

- A4 aktuell  
A6 Schallschutz/Akustik

# Methoden zum Einsatz diskreter, webbasierter Wetterprognosen in Gebäudetechnik und Lastmanagement

Prognosegeführte Regelungen verwenden zumeist kostenpflichtige stündliche Wetterprognosen, die auf der momentan gemessenen Außentemperatur basieren (z. B. Verschiebemethode) oder stündliche Prognosen eines nationalen meteorologischen Dienstes für den jeweiligen Standort. Mit Hilfe der prognostizierten Werte werden unter Verwendung geeigneter Modelle die jeweils benötigten Lastgänge vorausberechnet und weiterverarbeitet. Das Internet hingegen bietet die Möglichkeit, von vielen Anbietern kostenfrei Wetterprognosen für beliebige Standorte zu erhalten. Gewöhnlich sind diese Prognosen zumindest für die maximale und minimale Außentemperatur für fünf bis maximal neun Tage im Voraus verfügbar. Für die meisten Anwendungen in der Gebäude- und Energietechnik werden jedoch Werte in stündlicher bzw. viertelstündlicher Auflösung benötigt. Gegenstand dieses Aufsatzes ist die Beschreibung eines Verfahrens zur Erstellung von zeitlich beliebig aufgelösten Wetterdaten auf Basis von frei verfügbaren Wetterprognosen aus dem Internet. Als Beispiele für den Einsatz der darauf basierenden prognosegeführten Regelung werden die Beladung eines Eisspeichers sowie die Lastprognose eines Gebäudes bzw. einer Liegenschaft besprochen.

**Using Discrete Online Weather Forecasts for Building Services Applications and Load Management.** *Usually, commercially used hourly weather forecasts of national weather institutes are implemented for predictive control strategies. Energy demand and energy loads are calculated by utilizing adequate models with predicted air temperatures. However, on the internet, numerous providers offer freely available weather forecasts. Mostly forecasts of maximum and minimum outside air temperatures are available for five to nine days in advance. Many applications in building services do require hourly or quarter-hourly data. This paper describes a method for generating weather data of any resolution for freely available weather forecasts issued by online services. Ice storage and load prediction of a building are cited as examples of predictive control strategies using web-based weather forecasts.*

## 1 Internet-Datenakquisition

Die Anforderungen an einen wirtschaftlichen und ökologisch ausgewogenen Betrieb von Gebäuden werden zunehmend anspruchsvoller und komplexer. Viele davon lassen sich heute schon mittels moderner Gebäudeleittechnik automatisiert erfüllen. Einen Schritt weiter noch geht die prognosegeführte Gebäudesteuerung. Mit dieser wer-

den nicht nur aktuelle Zustände des Gebäudes einbezogen, sondern Prognosen (Wetter, Nutzerverhalten, etc.) für Tage im Voraus genutzt. Dies führt nicht nur zu Einsparungen an Energie sondern auch zu einem langfristig stabilen Raumklima. Das Internet bietet hierfür die Möglichkeit von vielen Anbietern kostenfrei Wetterprognosen für zahlreiche Standorte zu erhalten. Zahlreiche Webdienste stellen Prognosen für die Tageshöchst- und Tagestiefsttemperaturen der folgenden Tage zur Verfügung. Diese Daten von Online-Wetterseiten sind tagesaktuell und ohne Zeitverzögerung durch Verhandlungen mit meteorologischen Diensten verfügbar und für viele Anwendungen in der Gebäudetechnik hinreichend genau.

Die Datenakquisition (Bild 1) erfolgt mittels automatisierter Internet-Query. Die Web-Abfrage kann direkt in einem Spreadsheet-Programm (z. B. MS Excel) gestartet werden. Daten, die in Tabellenform (als Einzeltabellen oder eingebunden in mehrere Tabellen) auf Internetseiten zugänglich sind, werden direkt in das Spreadsheet-Programm importiert. Der Zugriff auf Wetterhomepages erfolgt zeitlich frei skalierbar und ermöglicht daher eine regelmäßige Aktualisierung der Daten. Die in dieser Studie eingesetzte Form der Standard-Webabfrage eignet sich zur Erfassung von Online-Daten aus Tabellen und Texten. Wettervorhersagen, die in eine Grafik oder Flash-Applikation eingebunden sind, müssen zuvor über Texterkennung geeignet umgewandelt werden.

Die importierten Daten werden in einem Spreadsheet-Programm aufbereitet und stehen für die Weiterverwendung in Form von sortierten Datenreihen zur Verfügung. Gewöhnlich sind diese Prognosen zumindest für die maximale und minimale Außentemperatur für fünf bis maximal neun Tage im Voraus verfügbar.

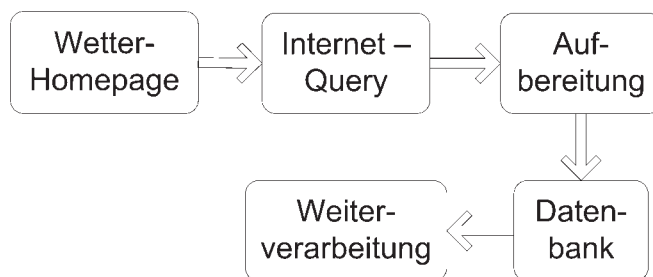


Bild 1. Datenakquisition im Internet  
Fig. 1. Online data acquisition

Um tägliche Wetterprognosen aus dem Internet für eine prognosegeführte Regelung verwenden zu können, muss aus den prognostizierten Tagesminima bzw. Tagesmaxima ein stündlicher Tagestemperaturverlauf generiert werden. Für diese Studie wurden beispielhaft Wettervorhersagen des Anbieters <http://de.weather.com> [6] verwendet.

## 2 Wetterdatengenerierung

In der Literatur finden sich verschiedene Ansätze zur Generierung von Wetterdaten mit unterschiedlichen Anforderungen an die Ausgangsdaten und den Detaillierungsgrad der berechneten Wetterdaten [3], [4], [5]. Dieser Aufsatz untersucht geeignete Modelle zur Erstellung von Außentemperaturverläufen, deren Qualität typischen Anwendungen der prognosegeführten Gebäudesteuerung genügt und die eine einfache und rasche Implementierung ermöglichen. Untersucht wird jeweils ein Ansatz für standortabhängige und standortunabhängige Datengenerierung. Abschließend werden die entwickelten Modelle mit einem Modell aus der Literatur verglichen.

### 2.1 Spline-Interpolation

Eine einfache Methode zum Ausrollen der diskreten Prognosewerte aus dem Internet zu einem stündlichen Temperaturverlauf ist die Spline-Interpolation. Spline-Kurven sind Funktionen, die sich stückweise aus Polynomen zusammensetzen und durch gegebene Punkte verlaufen. Bei der Wetterdatenerstellung mit Hilfe von Splines sind die Tagesminima bzw. -maxima jene Fixpunkte im Koordinatensystem, die durch die Spline-Kurve verbunden werden.

Die Berechnung eines kontinuierlichen Temperaturverlaufs auf Grund einzelner Vorhersagewerte kann mittels Spline-Interpolation standortunabhängig und rasch durchgeführt werden. Algorithmen zur Berechnung von Spline-Kurven sind in vielen mathematischen Softwarepaketen hinterlegt. Einzig benötigte Eingabedaten sind die Datenpaare (Zeitpunkt | Temperatur) jedes punktuellen Prognosewerts. Da die Spline-Interpolation standortabhängige Qualitäten des Tagesverlaufs (z. B. Zeitpunkt der Tagesextremtemperaturen) nicht berücksichtigt, ist die Qualität des ermittelten Tagesverlaufs stark von den Eingabedaten abhängig.

In dieser Studie wurden für das Ausrollen der diskreten Vorhersagewerte zu einem kontinuierlichen Tagestemperaturverlauf kubische Splines verwendet. Kubische Splines sind Kurven, deren Teilstücke zwischen den Prognosewerten von Polynomfunktionen 3. Ordnung beschrieben werden. Die Gesamtkurve ist glatt, an jeder Stelle zweimal stetig differenzierbar und weist eine minimale Gesamtkrümmung auf.

Für die Interpolation des Tagestemperaturverlaufs werden kubische Splines der Polynominterpolation mit Polynomfunktionen höheren Grades vorgezogen, da durch die stückweise Beschreibung der Kurve eine starke Oszillation vermieden werden kann. Spline-Kurven neigen ebenfalls zum Überschwingen, jedoch in geringerem Maße da sich die Teilstücke aus Polynomfunktionen 3. Ordnung zusammensetzen. Auf Grund dieses modellbedingten Nachteils können Spline-Kurven nicht uneingeschränkt für die

Wetterdatenerstellung empfohlen werden. Auf Grund des Überschwingens können die Hoch- und Tiefpunkte der Spline-Kurve von den vorgegebenen Temperaturwerten, d. h. den prognostizierten Höchst- und Tiefsttemperaturen, abweichen. Die Minima und Maxima der Temperaturverläufe bestimmen vielfach jedoch auch die benötigten Minimal- und Maximalleistungen.

### 2.2 Zeitfaktor-Methode

Die Verwendung einer synthetischen, an die Sinusfunktion angelehnten Kurve vermeidet das Überschwingen der Spline-Interpolation. Diese Methode, auch Zeitfaktor-Methode genannt, basiert auf der qualitativen Nachbildung eines typischen Tagestemperaturverlaufs eines Standorts zur Erzeugung von kontinuierlichen Temperaturverläufen. Die Beschreibung des Zusammenhanges zwischen Prognosemaximum bzw. -minimum der Temperatur und dem mittleren Tagestemperaturverlauf eines Standorts erfolgt durch Zeitfaktoren, die auf der Außentemperatur für jede Stunde des Tages beruhen. Auf dieser Basis geben die für einen Standort ermittelten Zeitfaktoren den qualitativen Verlauf der täglichen Außentemperatur wieder.

Der Zeitfaktor  $f$  wird durch das Verhältnis der momentan herrschenden Temperatur zur größten Temperaturspreizung des Tages bestimmt, Gl. (1):

$$f = \frac{t_i - t_{\min}}{t_{\max} - t_{\min}} \quad (1)$$

mit:

$f$	Zeitfaktor [-]
$t_{\min}$	Tagesminimum der Außentemperatur [°C]
$t_{\max}$	Tagesmaximum der Außentemperatur [°C]
$t_i$	Temperatur zum Zeitpunkt $i$ [°C].

Der Zeitfaktor kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Für das Tagesminimum  $t_{\min}$  gilt Zeitfaktor  $f = 0$ , für das Tagesmaximum  $t_{\max}$  beträgt der Zeitfaktor  $f = 1$ .

Zur Bestimmung eines mittleren Zeitfaktors werden Außentemperaturen des gewählten Standorts in stündlicher Auflösung benötigt. Als Ausgangsdaten können Temperaturmessdaten oder statistisch ermittelte stündliche Temperaturen eines gesamten Jahresverlaufs (z. B. Temperaturdaten aus Wetterdatensätzen für thermisch-dynamische Gebäudesimulationen) verwendet werden. Aus dem Median der Außentemperaturen wird für jede Stunde des Tages ein Zeitfaktor berechnet. Liegen Messdaten in höherer Auflösung (z. B. viertelstündliche Messwerte) vor, können die Zeitfaktoren auch in geringeren Schrittweiten ermittelt werden.

Die aus den Medianen der Stundenwerte errechneten Zeitfaktoren beschreiben den mittleren, qualitativen Verlauf der Tagestemperatur eines Jahres für den gewählten Standort. Da der qualitative Tagestemperaturverlauf als konstant betrachtet wird, ist der Zeitpunkt, an dem das tägliche Maximum bzw. Minimum auftritt, ebenfalls für das gesamte Jahr konstant.

Nach Berechnung der Zeitfaktoren eines mittleren Tagestemperaturverlaufs kann aus den prognostizierten Extremtemperaturen eines Tages ein stündlicher Temperaturverlauf berechnet werden. Die Temperatur zum Zeitpunkt  $i$  ergibt sich demnach aus dem zeitabhängigen Fak-

tor  $f$ , der Steigung der Tagestemperaturkurve und dem Tagesminimum, Gl. (2):

Außentemperatur zum Zeitpunkt  $i$

$$t_i = f_i \cdot (t_{\max} - t_{\min}) + t_{\min} \quad (2)$$

Im Rahmen dieser Studie wurden Zeitfaktoren für den Standort Wien berechnet. Datengrundlage bildeten Temperaturmesswerte des Jahres 2006, aufgenommen von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik [7]. Bild 2 zeigt die Zeitfaktoren, die aus dem stündlichen Median der Außentemperatur für Wien berechnet wurden. Die Zeitpunkte der Extremwerte weichen saisonbedingt um ca. 1 Stunde von der Gesamtjahreskurve ab. In der weiteren Betrachtung werden für jeden Tag des Jahres die Zeitfaktoren der Gesamtjahreskurve verwendet, wobei das Temperaturminimum um 04:30 Uhr, das Temperaturmaximum täglich um 13:30 Uhr auftritt.

Die Kurve der Zeitfaktoren des Gesamtjahres wurde für die weitere Bearbeitung durch eine Polynomfunktion 6. Ordnung geglättet. Abhängig von den verwendeten Ausgangsdaten können für einen Standort verschiedene Zeitfaktor-Kurven ermittelt werden. Bild 3 stellt Zeitfaktoren dar, die aus den Medianen des Jahrestemperaturverlaufs der gemessenen Außentemperatur sowie den statistischen

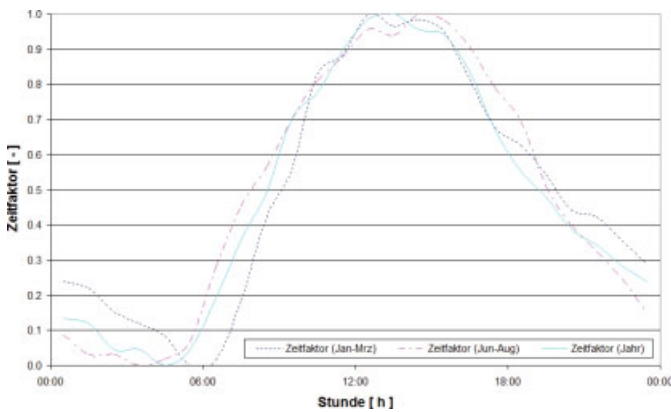


Bild 2. Zeitfaktor (Außentemperaturmesswerte Wien)  
Fig. 2. Coefficient of time (outside dry bulb temperature, Vienna)

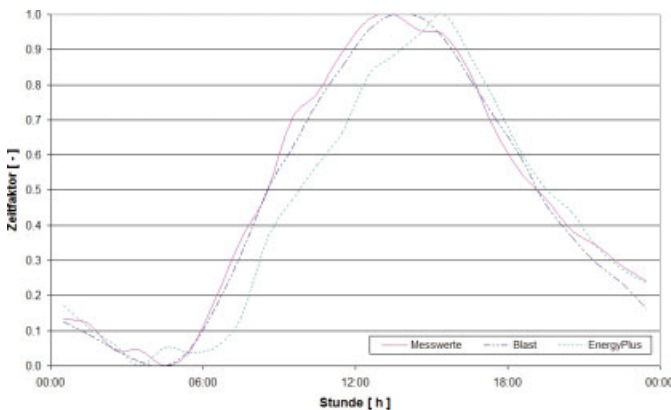


Bild 3. Vergleich von Zeitfaktoren auf Basis unterschiedlicher Ausgangsdaten  
Fig. 3. Comparing time coefficients derived from different data sources

Daten der Wetterdatensätze der Gebäudesimulationsprogramme BLAST und EnergyPlus ermittelt wurden [8], [9]. Für die folgenden Betrachtungen dieser Studie wurden jene Zeitfaktoren verwendet, die sich aus dem Wetterdatensatz für BLAST ergeben.

Wird der Tagestemperaturverlauf mittels Zeitfaktoren ermittelt, ergibt sich der gleiche qualitative Verlauf für alle Tage. Die Temperatur sinkt bei Tagesbeginn (00:30 Uhr) ab, erreicht für den Standort Wien um 04:30 Uhr das Tagesminimum und steigt in der Folge bis zum Tagesmaximum um 13:30 Uhr. Ab 13:30 Uhr sinkt die Außentemperatur wieder ab. Der Übergang zwischen zwei Tagen erfolgt sprunghaft, da Zeitfaktoren nicht die Entwicklungen des Folgetags berücksichtigen.

Zur Vermeidung von sprunghaften Temperaturänderungen bei der Anbindung des Folgetags wird der Temperaturverlauf ab dem Erreichen des Tagesmaximums (13:30 Uhr) bis zum Beginn des nächsten Tages (00:30 Uhr) linearisiert. Durch die Linearisierung wird gewährleistet, dass die Extremtemperaturen erreicht werden und der Übergang zwischen Tag 1 um 23:30 Uhr und Tag 2 um 00:30 Uhr fließend ist.

Für die linearisierten Stundenwerte zwischen 13:30 Uhr und 00:30 Uhr gilt Gl. (3):

$$t_i = t_{i-1} \frac{t_{\max(\text{Tag1})} - t_{00:30(\text{Tag2})}}{11} = t_{i-1} \frac{t_{\max(\text{Tag1})} - (f_{00:30} \cdot (t_{\max(\text{Tag2})} - t_{\min(\text{Tag2})}) + t_{\min(\text{Tag2})})}{11} \quad (3)$$

mit:

- $t_i$  Temperatur zur Stunde  $i$  [°C]
- $t_{i-1}$  Temperatur zur Stunde  $i - 1$  [°C]
- $t_{\max(\text{Tag1})}$  Tagesmaximum der Außentemperatur [°C]
- $t_{\max(\text{Tag2})}$  Tagesmaximum der Außentemperatur des Folgetags [°C]
- $t_{\min(\text{Tag2})}$  Tagesmaximum der Außentemperatur des Folgetags [°C]
- $t_{00:30(\text{Tag2})}$  Außentemperatur des Folgetages um 00:30 Uhr [°C]
- $f_{00:30}$  Zeitfaktor zur Stunde 00:30 Uhr [-].

### 2.3 Vergleich der Inter- bzw. Extrapolationsmethoden

Zur Beurteilung der entwickelten Methoden wurden die mittels Zeitfaktoren und Spline-Interpolation berechneten stündlichen Temperaturverläufe mit der von Degelman [3] entwickelten Methode zum standortunabhängigen Ausrollen von diskreten Temperaturdaten verglichen.

#### Ermittlung eines kontinuierlichen Temperaturverlaufs nach Degelman:

Aus diskreten Temperaturwerten (z. B. Messwerte, statistisch ermittelte Tagesminima und -maxima oder Prognosewerte) kann ein zeitlich beliebig aufgelöster Tagestemperaturverlauf ermittelt werden. Der Temperaturverlauf wird durch eine an die Sinuskurve angelehnte Funktion beschrieben.

Degelman unterteilt den Tagestemperaturverlauf in drei Phasen. Für den Temperaturverlauf von Sonnenaufgang bis 15:00 Uhr, Gl. (4) werden die mittlere Morgen-

temperatur und die maximale Tagestemperaturspreizung berücksichtigt. Diese Variablen beziehen sich ausschließlich auf den betrachteten Tag. Der Temperaturverlauf von 15:00 Uhr bis Mitternacht, Gl. (5) bezieht die mittlere Abendtemperatur und die maximale Nachttemperaturspreizung mit ein, die Temperaturentwicklungen des Folgetags beinhalten.

Der Temperaturverlauf von Mitternacht bis Sonnenaufgang, Gl. (6) berücksichtigt die mittlere Abendtemperatur und die maximale Nachttemperaturspreizung. In alle Gleichungen gehen die Zeitpunkte des Sonnenaufgangs bzw. Sonnenuntergangs ein. Auf diese Weise wird ein Temperatursprung zwischen zwei aufeinander folgenden Tagen vermieden. Modellbedingt legt *Degelman* den Zeitpunkt, an dem die maximale Außentemperaturspreizung auftritt, mit 15:00 Uhr fest.

$$T_t = T_{ave0} \cdot \frac{T}{2} \cdot \cos \left( \frac{t - t_R}{15} \right) \quad (4)$$

$$T_t = T_{ave1} + \frac{T}{2} \cdot \cos \left( \frac{t - 15}{t_R + 9} \right) \quad (5)$$

$$T_t = T_{ave1} + \frac{T}{2} \cdot \cos \left( \frac{t + 9}{t_R + 9} \right) \quad (6)$$

wobei:

- $T_{max}$  max. Außentemperatur [°C]
- $T_{min}$  min. Außentemperatur [°C]
- $T_{min1}$  min. Außentemperatur des nächsten Tages [°C]
- $T_t$  Temperatur zum Zeitpunkt t [°C]
- $T_{ave0}$  mittlere Morgentemperatur:  $(T_{min} + T_{max})/2$  [°C]
- $T_{ave1}$  mittlere Abendtemperatur  $(T_{max} + T_{min1})/2$  [°C]
- T maximale Tagestemperaturspreizung  $T_{max} - T_{min}$  [°C]
- T maximale Nachttemperaturspreizung  $T_{max} - T_{min1}$  [°C]
- $t_R$  Stunde des Sonnenaufgangs [h]
- $t_R$  Stunde des Sonnenaufgangs des nächsten Tages [h].

Tabelle 1 und Bild 4 vergleichen die angewandten Methoden zur Inter- bzw. Extrapolation der stündlichen Wetterdaten. Alle besprochenen Methoden können modellbedingt Änderungen im qualitativen Tagesverlauf nicht berücksichtigen. Da pro Tag jedoch nur zwei Extremwerte gegeben sind, eignen sie sich für diese Art der Wetterdatenerstellung. In dieser Studie wird die Zeitfaktor-Methode bevorzugt, da mit dieser das störende Überschwingen nicht auftritt.

Tabelle 1. Methoden zur Inter- und Extrapolation von diskreten Prognosewerten  
Table 1. Methods for inter- and extrapolation of discrete forecasts

Methode	Vorteile	Nachteile
Spline-Interpolation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- geringer Datenbedarf</li> <li>- kontinuierlicher Tagesübergang</li> <li>- rasch durchführbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Überschwingen</li> <li>- qualitativer Tagesverlauf von Eingabedaten abhängig</li> </ul>
Zeitfaktoren	<ul style="list-style-type: none"> <li>- qualitativer Tagesverlauf auf den Standort abgestimmt</li> <li>- kein Überschwingen</li> <li>- geringer Datenbedarf</li> <li>- rasch durchführbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Linearisierung des Tagesübergangs notwendig</li> <li>- standortabhängige Messdaten/statistische Daten für initiale Zeitfaktorermittlung notwendig</li> </ul>
<i>Degelman</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- qualitativer Tagesverlauf auf den Standort abgestimmt</li> <li>- kein Überschwingen</li> <li>- kontinuierlicher Tagesübergang</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- erhöhter Datenbedarf für Sonnenaufgang und Sonnenuntergang</li> </ul>

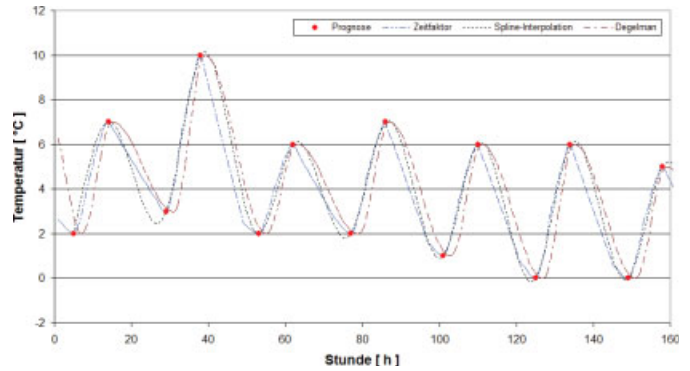


Bild 4. Vergleich der Inter- bzw. Extrapolationsmethoden  
Fig. 4. Comparison of inter- and extrapolation methods

### 3 Anwendung Energietechnik

Die Versorgungssicherheit in der elektrischen Energieversorgung wird seit längerem von der effizienten Nutzung von erneuerbaren Energiequellen und der Effizienz des Versorgungssystems selbst bestimmt. So war noch vor der Gebäudetechnik die Energiewirtschaft auf zeitbezogene Wetterprognosen angewiesen, um die regionale wetterabhängige Energieabnahme präzise prognostizieren zu können. Gerade die hohe Volatilität in der Erzeugung von elektrischer Energie durch wetterabhängige erneuerbare Energieträger (z. B. Wind, Photovoltaik), aber auch die ausgeprägten Lastprofile des Verbrauchs stellen eine Herausforderung für die Betriebsführung dar. Im traditionellen Netzbetrieb versucht man die Erzeugungssituation dem Verbrauch anzupassen, der als gegeben und unveränderbar betrachtet wird. Im Zusammenhang mit einer stärkeren Nutzung von volatilen Erzeugern gewinnen Methoden zur verbrauchsseitigen Beeinflussung, zusammengefasst unter dem Begriff *Demand Side Management*, zunehmend an Bedeutung, da der Grad der effektiven Beeinflussbarkeit auf der Erzeugerseite abnimmt. Mit der wetterprognosegeführten Regelung wird die Verbraucherseite derart beeinflusst, dass Lastverschiebungen zur optimalen Ausnutzung verfügbarer „virtueller“ Energiespeicher vorgenommen werden.

Folgende Strategien können bei Demand Side Management zum Tragen kommen, wobei Wetterprognosen in unterschiedlicher Form eingesetzt werden [13]:

**Strategic Conversation**

Bei strategischer Konversation wird der Stromverbrauch generell gesenkt, ohne dabei das eingesparte Potential zu einem anderen Zeitpunkt zu kompensieren. Dies wird auch als Load Shedding bezeichnet.

**Load Shifting**

Unter dieser Methode versteht man ganz allgemein die Verlagerung von Stromverbrauch von kritischen Zeitbereichen (on-peak) in weniger kritische Zeitbereiche (off-peak). Über eine längere Zeitperiode bleibt aber die Summe des Energieverbrauchs insgesamt gleich.

**Peak Clipping**

Bei Spitzenreduktion wird der Strombedarf zu einem bestimmten Zeitpunkt (on-peak) reduziert. Dieser wird entweder nicht nachgeholt (strategische Konversation), oder muss zu einem späteren Zeitpunkt (off-peak) wieder eingebracht werden (Valley Filling).

**Valley Filling**

Bei dieser Strategie soll zusätzlicher Verbrauch, der sonst zu Spitzenlastzeiten anfallen würde, in Zeitbereiche geringeren Strombedarfs (off-peak) hineinverlagert werden. Peak Clipping in Kombination mit Valley Filling ist eine mögliche Strategie für Load Shifting.

Ein wichtiger Aspekt in diesem Zusammenhang ist die Idee des virtuellen elektrischen Energiespeichers [13]. Ein solcher speichert Energie, ist jedoch im Gegensatz zu einem echten elektrischen Energiespeicher nicht in der Lage, die gespeicherte Energie in elektrischer Form wieder abzugeben. Die Energieabgabe äußert sich vielmehr nur durch einen zeitweilig reduzierten Verbrauch. Hierfür sind eine genaue Kenntnis der Wetterabhängigkeit des Verbrauches sowie deren Implementierung in geeignete Prognosefunktionen notwendig. Die hierfür entwickelten energiewirtschaftlichen Methoden und Verfahren zur Erstellung und Optimierung von wetterabhängigen Lastprognosen können gleichfalls im Lastmanagement von Liegenschaften bzw. Gebäuden eingesetzt werden.

Die wichtigste Voraussetzung für die Anwendung o. g. Strategien ist eine qualifizierte Lastgangprognose. Hierfür ist die Analyse der historischen Lastgänge die wesentliche Grundlage und der erste Schritt für die Mengen- und Produktermittlung, die ihrerseits stets eine Prognose darstellt (Short-Term zur Lastanmeldung, Long-Term zum Energieeinkauf). Zu diesem Zweck wird die Wetterprognose in der für die Energiewirtschaft typischen viertelstündlichen Auflösung benötigt, wobei die zentrale Abhängigkeit die Außentemperatur ist.

**Vorgehen**

Im ersten Schritt wird die Zeitreihe elektrische Leistung (Zählimpulse innerhalb einer Viertelstunde gewichtet als konstante elektrische Leistung innerhalb dieser Zeit) mit den Werten der Außentemperatur überlagert. Diese typische Darstellung gibt nur qualitativ die Abhängigkeit der Größen voneinander wieder. Trägt man hingegen die elektrische Leistung über der dazugehörigen Außentemperatur auf, so wird eine tendenzielle Abhängigkeit sichtbar (Bild 5). Aus den temperaturabhängigen Leistungsmesswerten wird

durch Regressionsanalyse eine mathematische Abhängigkeit – die Prognosefunktion – generiert. Für beheizte und gekühlte Gebäude eignet sich hierzu die hyperbolische Tangensfunktion [11]. Die Parameter der Funktion wurden dabei so eingeführt, dass sie das physikalische Gesamtlastverhalten des Gebäudes interpretierbar widerspiegeln:

$$P_{\text{elektr}} = P_{\text{min}} + \frac{(P_{\text{max}} - P_{\text{min}}) \cdot [\tanh(a \cdot t + k) + 1]}{2} \quad (7)$$

mit:

- $P_{\text{max}}, P_{\text{min}}$  maximale und minimale Anlagenleistungen
- $a$  Anstieg der Kurve als Indikator für die Kühlgeschwindigkeit
- $k/a$  Außentemperatur im Wendepunkt der Kurve als Prozessmerkmal.

Mittels dieser Funktion kann unter Zuhilfenahme von prognostizierten Wetterdaten und einer zeitabhängigen Grundlastkurve das Leistungsverhalten des Gebäudes vorausgesagt werden (Bild 6). Die Grundlastkurve wird als Zeitvektor dabei aus allen vorliegenden Tageslastgängen mittels des Verfahrens des empirischen Medians gebildet. Dieser ist der n+1-te Wert von zwei n+1-Werten, nach der Größe sortiert. Ausgehend von diesem Wert liegt eine statistische Gleichverteilung vor, da genau n Werte kleiner und n

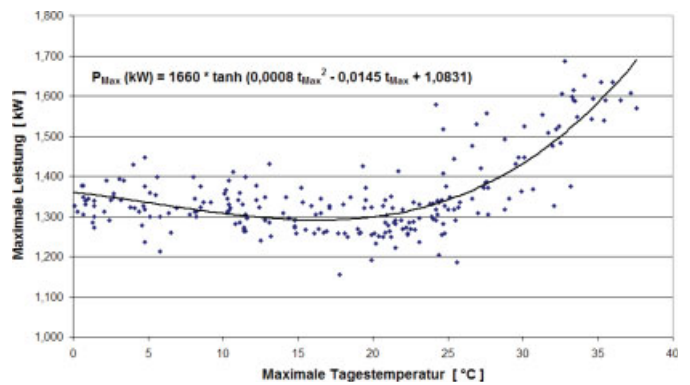


Bild 5. Maximale elektrische Leistung aufgetragen über der korrespondierenden maximalen Außentemperatur  
Fig. 5. Peak electric load plotted against the time-corresponding maximum of outside dry bulb temperature

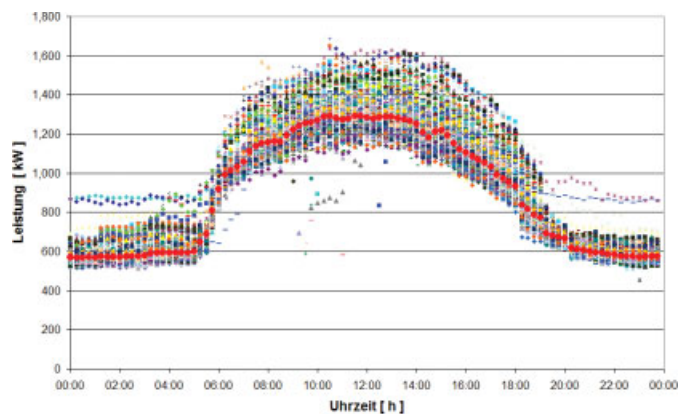


Bild 6. Tageskurven eines Jahres und Grundlastkurve (Median)  
Fig. 6. Daily load curves of a year and base load curve (median)

Werte größer sind als der empirische Median. Der Vorteil gegenüber dem arithmetischen Mittelwert besteht darin, dass selbst bei Vorliegen einer geringen Zahl an Messwerten Ausreißer das Ergebnis nicht verfälschen können. Durch Abzug der Grundlastkurve von den einzelnen Tagesgängen erhält man den außentemperaturabhängigen Anteil der Tagesgänge, der mittels der Wetterprognosen nach Zeitfaktor-Methode und den Gln. (3) und (7) als elektrische Leistung prognostiziert werden kann.

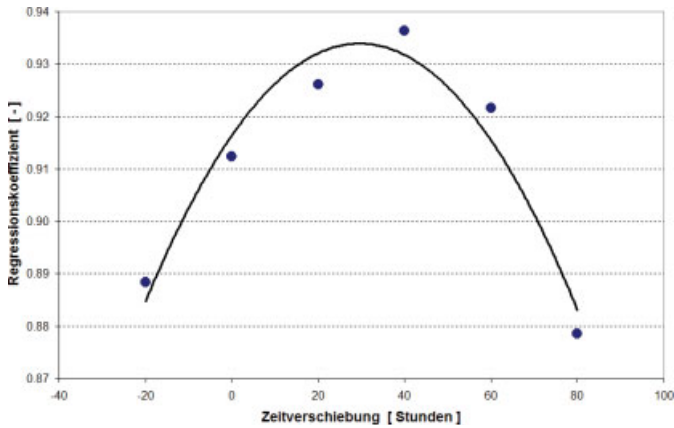


Bild 7. Regressionskoeffizienten der Gl. (7) in Abhängigkeit von der Zeitverschiebung  
 Fig. 7. Regression coefficient of equation (7) plotted against time shift

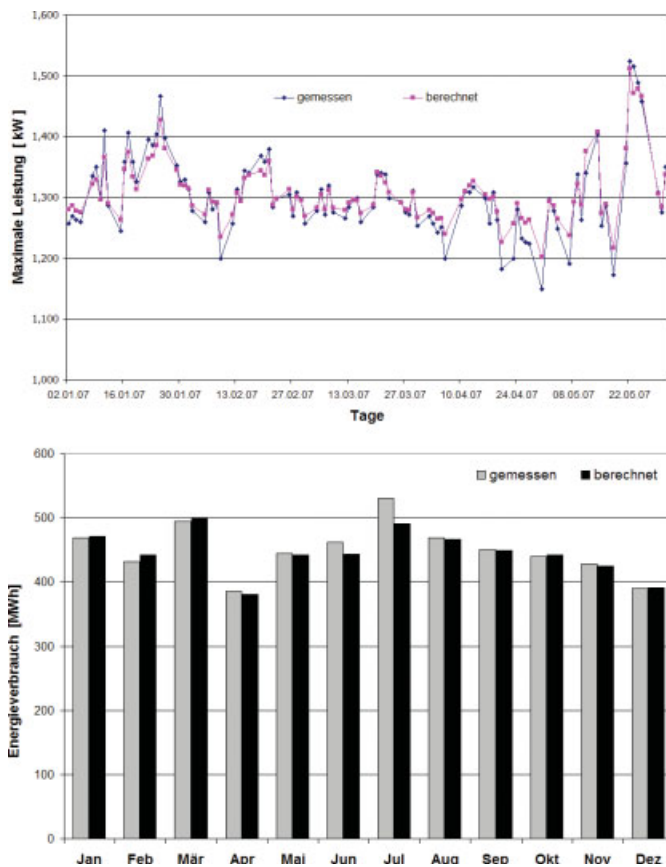


Bild 8. Vergleich von Messung und Lastprognose (oben: Leistung-Stundenwerte, unten: Verbrauch-Monatssummen)  
 Fig. 8. Comparison of measurement data and load prediction (above: hourly power values, below: monthly consumption)

Die Zeitverzögerung erhält man aus Messdaten, wenn die elektrischen Leistungswerte nicht über der zeitlich korrespondierenden Außentemperatur sondern sukzessive um ein Zeitintervall verschoben aufgetragen werden. Für jedes Intervall werden mittels Regression die Koeffizienten und der Regressionskoeffizient der Gl. (7) bestimmt. Dieser wird über der entsprechenden Zeitverschiebung aufgetragen. Der maximale Regressionskoeffizient zeigt an, zu welchem Zeitpunkt die Leistungswerte mit der zeitlich verzögerten Außentemperatur am besten harmonisieren, d. h. welche Zeitverzögerung dem System immanent ist (Bild 7).

Auf dieser Grundlage können mit guter Genauigkeit (Bild 8) technische Maßnahmen (Lastmanagement) bzw. organisatorische Maßnahmen (Energieeinkauf) getroffen werden.

#### 4 Anwendung Gebäudetechnik

Das Wetter ist eine der wesentlichen Ursachen dafür, dass Gebäude beheizt oder gekühlt werden müssen. In Zeiten steigender Energiepreise sind mehr denn je Technologien gefragt, welche die Kosten für thermische und elektrische Energie minimieren und den thermischen Komfort im Gebäude maximieren. Eine Wettervorhersage-Steuerung erlaubt einen bedarfsgerechten, kosteneffizienten Betrieb wetterabhängiger Energieanlagen.

Eine konventionelle Regelungstechnik arbeitet mit fest eingestellten Zeiten (z. B. für Tag-Nacht-Absenkung) sowie fest eingestellten Kennlinien (z. B. Heizkennlinie in Kopplung mit Außentemperaturfühler). Die Starrheit dieses Konzeptes hat zum Nachteil, dass bei Wetterwechseln manuell nachjustiert werden muss. Auch wird grundsätzlich nicht der Fall berücksichtigt, dass in den Stunden nach einer Nachtabsenkung solare Gewinne je nach Himmelsorientierung und Anteil der Glasflächen an der Fassade einen großen Anteil der Beheizung übernehmen können, d. h. möglicherweise die Heizung morgens gar nicht erst hochgefahren werden muss. Dies trifft insbesondere für moderne, transparent gestaltete Gebäude mit guter Wärmedämmung zu.

Sowohl Wetter wie Nutzung sind zeitlich mitunter sehr dynamisch: Beim Wetter variiert die Außentemperatur, die Sonneneinstrahlung oder die Windgeschwindigkeit; die Nutzung des Gebäudes variiert nach Belegungszeiten, die von einem Tag/Nacht- oder Werktag/Wochenende-Rhythmus geprägt sind. Des Weiteren macht sich in massiven Gebäuden aufgrund der Wärmespeichermasse der Wände und Geschossdecken eine Veränderung der Außentemperatur erst Stunden, je nach Dämmstandard, Wärmetauscherart (Radiatoren, Betonkernaktivierung) und den Lüftungsgewohnheiten der Nutzer, sogar erst nach mehreren Tagen im Innenraum bemerkbar. Zwischen Wetteränderung außen und dem daraus resultierenden Energiebedarf zur Einhaltung einer gewünschten Temperatur des Gebäudeinneren tritt also eine nicht unerhebliche zeitliche Phasenverschiebung auf. Eine konventionelle, außentemperaturgeführte Regelung fordert jedoch Wärme bzw. Kälte für das Gebäudeinnere so an, als gäbe es diese Phasenverschiebung nicht. Umso deutlicher tritt diese Phasenverschiebung zu Tage, wenn die Energie aus einem Speicher entnommen wird, der zum gegebenen Zeitpunkt entsprechend verfügbar sein muss. Dies soll am Beispiel eines Eisspeichers verdeutlicht werden.



Die Grundlage für die Dimensionierung einer aus Kältemaschine und Eisspeicher bestehenden Verbundanlage ist die Kenntnis des zeitlichen Verlaufs des Kältebedarfs des Gebäudes über eine bestimmte Zykluszeit. Die übliche Auslegung erfolgt dann über die energetische Bilanzierung von Lade- und Entladephase (Bild 9) [14].

Damit stellt sich das Problem der Ladung/Entladung eines Speichers als die Überlagerung zweier Übertragungsfunktionen dar: die Verzögerung des Gebäudes und die Verzögerung im Speicher selbst. Beide Vorgänge benötigen z. T. sehr lange Vorlaufzeiten, weshalb ohne die Einbeziehung von Wetterprognosen eine gezielte Betriebsweise hinsichtlich Komfort und Energie kaum möglich ist.

*Verzögerung des Gebäudes*

Die Verzögerung eines Gebäudes kann entweder über eine Simulation des Gebäudes (dynamische Gebäudesimulation), eine Bauteilsimulation (instationäre Finite-Volumen- bzw. Finite-Elemente-Berechnung) oder aber durch Regressionsverfahren aus Messwerten bestimmt werden. Um das Prinzip zu verdeutlichen wurde einem Raum, der vorher mit einer konstanten Außentemperatur von 16 °C im Gleichgewicht stand, ein plötzlicher Sprung in der Außen-

temperatur von 10 K aufgeprägt. Untersucht wurde die Sprungantwort der Wand mittels des dynamischen Simulationsprogramms EnergyPlus (Bild 10) sowie mit einer Finite-Elemente-Berechnung mittels Matlab (Bild 11). Diese vereinfachte Betrachtung ist möglich, da die Wandstärke im Vergleich zu den übrigen Dimensionen des Raumes hinlänglich klein ist. Deutlich zu erkennen ist die gute Übereinstimmung beider Berechnungen, wobei sich aus der Finite-Elemente-Berechnung noch der Verlauf der Temperaturen im Inneren der Wand ableiten lässt (Bild 12). Des Weiteren zu erkennen ist, dass erst nach 2.500 Minuten, d. h. 40 Stunden, von einem eingeschwungenen Zustand in der Wand ausgegangen werden kann. 90 % der Sprungantwort werden nach ca. 1500 Minuten, d. h. ca. 25 Stunden erreicht. Damit muss seitens der Verzögerung des Gebäudes mit einer zumindest eintägigen Wetterprognose gearbeitet werden.

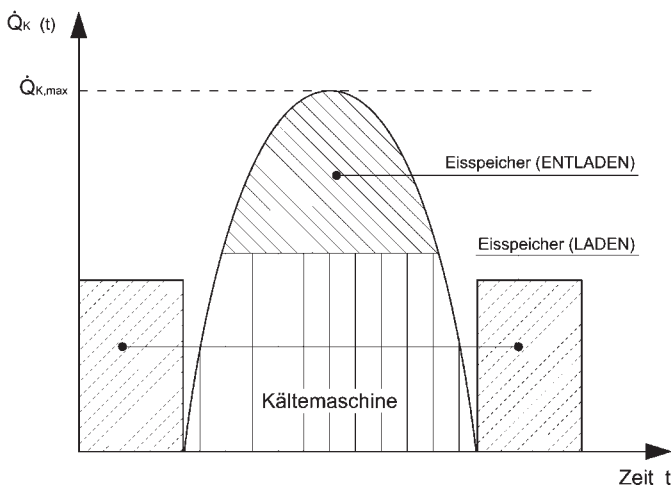


Bild 9. Be- und Entladezyklus des Eisspeichers [14]  
 Fig. 9. Charging and discharging of thermal ice storage [14]

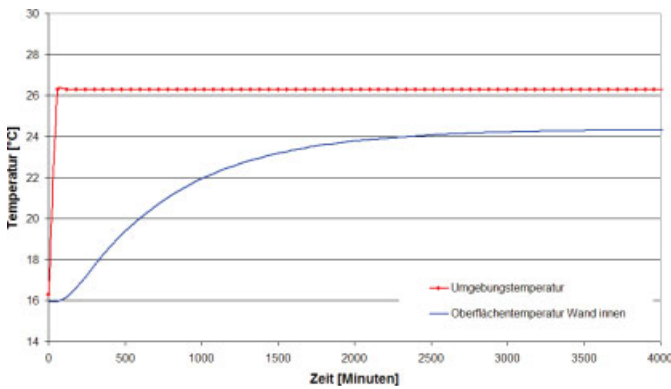


Bild 10. Oberflächentemperatur Wand innen; dynamische Gebäudesimulation mit EnergyPlus (Response-Faktor-Methode)  
 Fig. 10. Surface temperature of inner wall; dynamic simulation with EnergyPlus (response-factor-method)

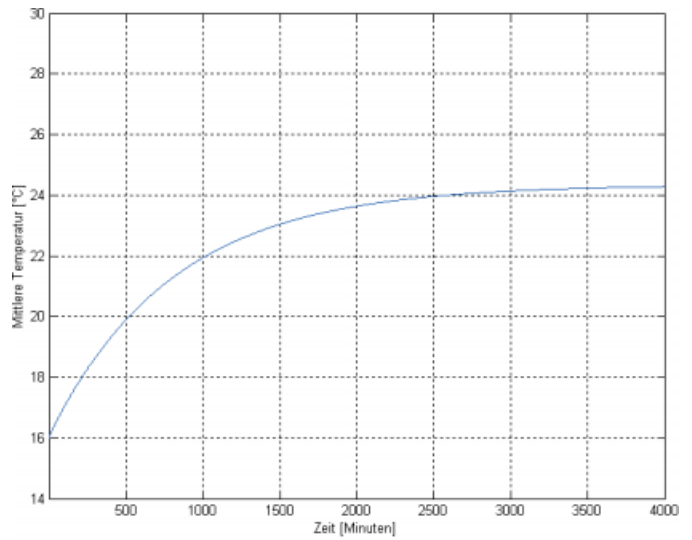


Bild 11. Oberflächentemperatur Wand innen (Finite-Differenzen-Methode)  
 Fig. 11. Surface temperature of inner wall (finite-difference-method)

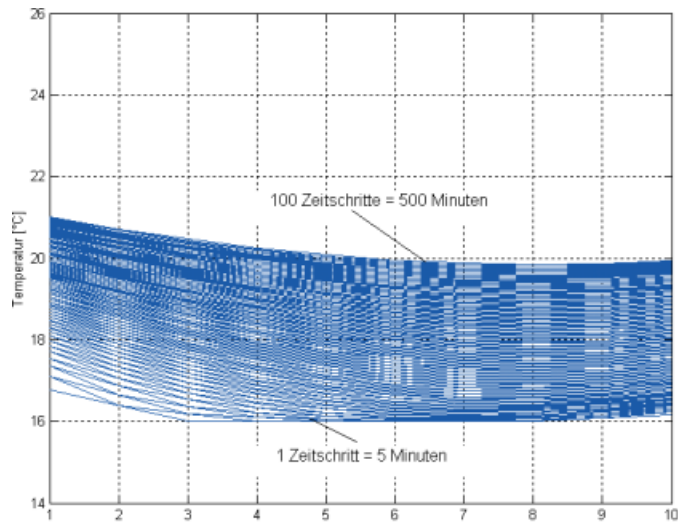


Bild 12. Temperaturverteilung in der Wand nach 500 Minuten (Finite-Differenzen-Methode)  
 Fig. 12. Temperature distribution inside the wall after 500 minutes (finite-difference-method)

### Verzögerung des Speichers

Mittels einer Simulation wurde auf der Basis von Prognosewerten für einen großen Bürokomplex in Wien der Lastverlauf für eine typische Sommerwoche bestimmt (Bild 13). Dieser setzt sich zusammen aus den inneren Lasten (Personen, Geräte und Beleuchtung) und wird vom Wettereinfluss überlagert (Außentemperatur und Strahlung, blaue Summenkurve).

Da die Kälteleistung für den Komplex aus ökologischen und wirtschaftlichen Überlegungen heraus begrenzt ist, wurde folgendes Konzept angedacht: Die Grundlast aus Personen, Geräten und Beleuchtung ist eine gut prognostizierbare, wetterunabhängige Größe, die über den Tag verteilt nahezu konstant ist. Diese kann durch eine fast stets im Betriebsoptimum laufende Kältemaschine gedeckt werden, die eine einfache Ein-/Aus-Steuerung besitzt.

Die wetterabhängige Last wird durch einen in der Nacht zu ladenden Eisspeicher gedeckt, der tagsüber keine zusätzliche Kälteleistung benötigt (Bild 14). Die Energiemenge und der Zeitpunkt der Ladung ergeben sich aus einer dynamischen Simulation, deren Eingangsgrößen Prognosewerte der Außentemperatur in stündlicher Auflösung sind. So wird sichergestellt, dass der Speicher für den Folgetag a) mit der erforderlichen Kapazität für behagliche Raumtemperaturen bereitsteht und b) kein unnötiger Energieeinsatz durch eine Überladung erfolgt [1].

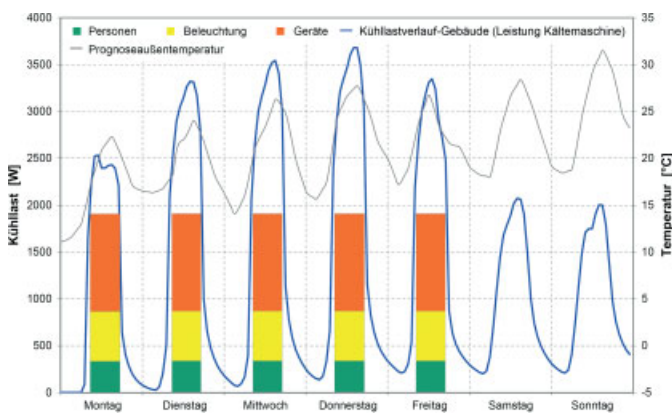


Bild 13. Lastverlauf eines Raumes ohne Eisspeicher  
Fig. 13. Load curve of a room without thermal ice storage

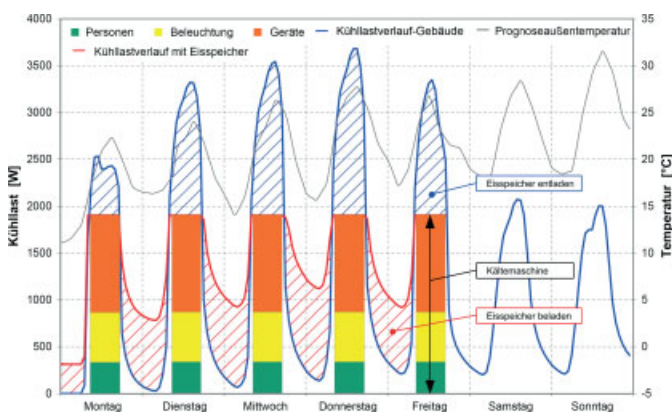


Bild 14. Lastverlauf eines Raumes mit Eisspeicher  
Fig. 14. Load curve of a room with thermal ice storage

## 5 Zusammenfassung

Kostenfrei verfügbare Online-Wetterprognosen können in hinreichender Genauigkeit für die meisten prognosegeführten Regelungen eingesetzt werden. Sie sind in der Anwendung flexibel und nahezu überall verfügbar.

Der Zugriff auf Online-Wettervorhersagen erfolgt über eine Standard-Webabfrage. Diese Form der Datenakquisition verbindet die automatisierte Webabfrage mit einer Datenbank, die zur weiteren Datenaufbereitung dient. Aus den diskreten Vorhersagewerten für Tageshöchst- und Tagestiefsttemperaturen werden mit verschiedenen Methoden kontinuierliche Tagestemperaturverläufe entwickelt, die für die prognosegeführte Gebäudesteuerung eingesetzt werden können.

Für die Generierung zeitlich beliebig aufgelöster Wetterdaten wurden die Spline-Interpolation und die Zeitfaktor-Methode untersucht. Die Spline-Interpolation ist eine sehr einfache, rasch zu implementierende Methode zum Ausrollen diskreter Prognosewerte. Die so berechneten Temperaturkurven neigen jedoch zum Überschwingen, d. h. die prognostizierten Temperaturmaxima und -minima entsprechen nicht den Hoch- und Tiefpunkten der Spline-Kurven. Die Zeitfaktor-Methode ermöglicht die Erstellung und Außentemperaturverläufen, deren Qualität Anwendungen der prognosegeführten Gebäudesteuerung genügt. Mit Hilfe von Zeitfaktoren können synthetische Wetterdaten erstellt werden, die den typischen Temperaturverlauf eines Standorts qualitativ nachbilden.

Die im Rahmen dieser Studie untersuchten Modelle zur Erstellung synthetischer Wetterdaten wurden abschließend mit dem von *Degelman* [3] beschriebenen Modell verglichen.

Für die vorgestellten Anwendungen aus der Gebäudetechnik (Eisspeicher) und der Energietechnik (Lastprognose) weisen die so generierten synthetischen Wetterdaten in Kombination mit den eingesetzten physikalischen Modellen der Weiterverarbeitung eine sehr gute Genauigkeit auf. Weiterführend kann unter Einbeziehung ebenso frei verfügbarer Prognosewerte wie Sonne, Wind und Regen die Prognosegenauigkeit kontinuierlich verbessert werden. Gleichfalls eröffnen sich damit neue Einsatzgebiete, wie z. B. die Optimierung des Betriebes von Solarkollektoren (Prognose Sonne) bzw. der Einspeisung von Windrädern ins Netz (Prognose Wind). Darüber hinaus werden seit November 2006 über die europaweit empfangbaren Funkuhren-Signale auch Wettervorhersagen für weite Teile Europas ausgesendet (Schweiz: Sender „HBG“ in Prangins/VD; Deutschland: Sender „DCF“ in Mainflingen bei Frankfurt). Damit vereinfacht sich die Anwendung der vorgestellten Methodik weiter, da nahezu ohne Zeitverzögerung und ohne Anbindung an das Internet Wetterprognosen eingebunden werden können.

## Literatur

- [1] Seerig, A., Sagerschnig, C., Stift, F.: Prognosegeführte Gebäudesteuerung: Das Wetter von morgen für die Gebäudesteuerung von heute. HLK Facility Management 5/1A (2008), S. 24.
- [2] Seerig, A., Sagerschnig, C., Stift, F.: Methoden zum Einsatz diskreter, Web-basierter Wetterprognosen in Gebäudetechnik

und Lastmanagement. Tagungsband BauSIM, Kassel 2008, S. 131–133.

[3] *Degelman, L.*: Simulation and uncertainty: Weather predictions. In: *Malkawi, A., Augenbroe, G.* (Hrsg.): Advanced Building Simulation. New York: Spon Press, 2003.

[4] *Zhang, Y., Hanby, V. I.*: Short-term prediction of weather parameters using online weather forecasts. Proceedings of Building Simulation, Peking 2007. pp. 1411–1416.

[5] *Himmeler, R., Peter, M., Sasse, Ch., Fisch, N. M., Cerny, R.*: WPR – Wetterprognosen-geführte Regelung thermisch aktivierter Decken. Tagungsband BauSIM, München 2006.

[6] Anonym: The Weather Channel. <http://de.weather.com> (2007).

[7] Messdaten der Außentemperatur für Wien. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), 2006.

[8] IWEC Wetterdaten des Simulationsprogramms EnergyPlus für Wien 2001. [www.energyplus.gov](http://www.energyplus.gov)

[9] RYD Wetterdaten des Simulationsprogramms BLAST für Wien 1980.

[10] *Seerig, A.*: Strom nach Maß: Handlungsalternativen zum Vollstrombezug vorbereiten und umsetzen. HLK Facility Management 8-9/2A (2005), S. 20.

[11] *Seerig, A.*: Last- und Verbrauchsverhalten der Warenhäuser der KARSTADT Warenhaus AG. Nicht veröffentlichte Studie (1999).

[12] *Töglhofer, Ch.*: Einsatzpotentiale von Wetterderivaten im Bereich Erneuerbarer Energien. Diplomarbeit. Karl-Franzens-Universität Graz, 2007.

[13] *Kupzog, F., Rösener, Ch., Palensky, P.*: Konzepte zur koordinierten Nutzung verteilter Energiespeicher. 5. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien 2007, S. 219–230.

[14] *Buchner, S., Hilligweg, A.*: Eine kennzahlgestützte Auslegungsmethodik für Eisspeicheranlagen. TAB 3/2006, S. 50–56.

**Autoren dieses Beitrages:**

Dr.-Ing. Axel Seerig, Abteilungsleiter Bauklimatik, Simulationen  
 Dipl.-Ing. (FH) Carina Sagerschnig, Mitarbeiterin Bauklimatik, Simulationen  
*Beide:*  
 Gruner AG, Gellertstrasse 55, CH – 4020 Basel/ Schweiz

@

# ONLINE DICTIONARY FOR CIVIL ENGINEERS

## ONLINE-FACHWÖRTERBUCH FÜR BAUINGENIEURE

37.000 terms

---

German <-> English  
English <-> German

---

37.000 Fachbegriffe

---

Deutsch <-> Englisch  
Englisch <-> Deutsch



TEST IT AND BUY A LICENSE:

[www.ernst-und-sohn.de/terms](http://www.ernst-und-sohn.de/terms)




008928036\_nm