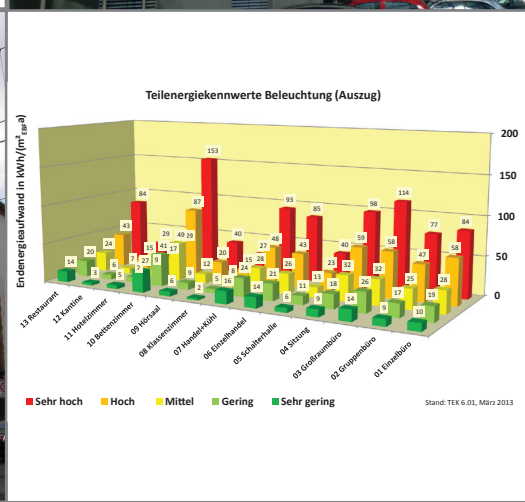
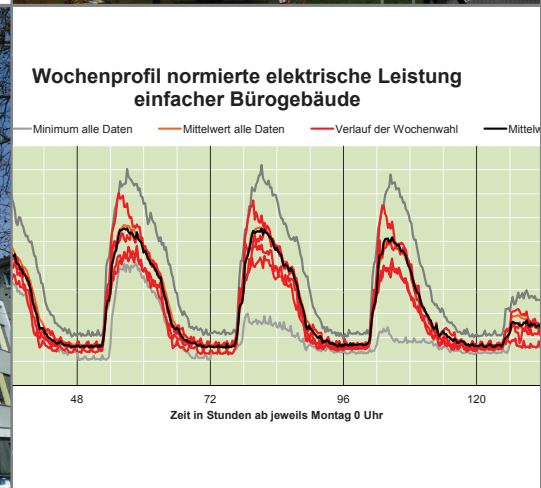
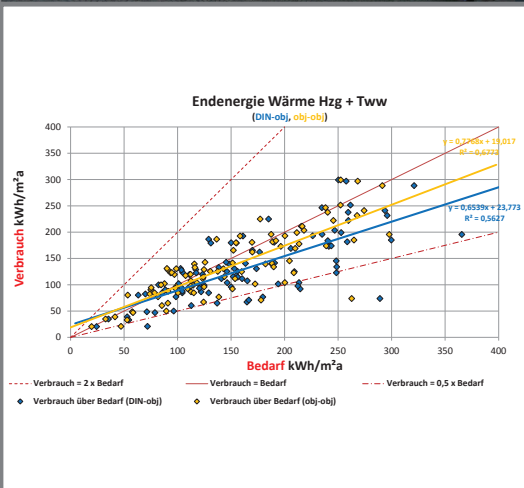


Teilenergiekennwerte

Neue Wege in der Energieanalyse von Nichtwohngebäuden im Bestand



A	Sehr gering	Entspricht einem Gebäude, mit fortgeschrittenen Effizienztechniken (z.B. Passivhaus-Komponenten).
B	gering	Entspricht einem Gebäude mit marktgängigen Effizienztechniken (Referenzgebäude EnEV 2009)
C	mittel	Entspricht etwa den Vergleichswerten des Energieverbrauchsausweises nach EnEV 2009 [BMVBS 2009b]
D	hoch	Entspricht etwa den Vergleichswerten des Energieverbrauchsausweises nach EnEV 2007 [BMVBS 2009b]
E	Sehr hoch	Entspricht nicht modernisierten Bestandsgebäuden mit offensichtlichen energetischen Defiziten



Inhalt

Vorwort

A	Energetische Analyse von Nichtwohngebäuden mit der Teilenergiekennwert-Methode	5
B	Lastgangmessungen zur Analyse von Energieeinsparpotenzialen in Gebäuden	16
C	Methode zur Hochrechnung von Teilenergiekennwerten auf der Basis von Kurzzeitmessungen	25

Titel: Teilenergiekennwerte – Neue Wege in der Energieanalyse von Nichtwohngebäuden im Bestand

Teilenergiekennwerte von Nichtwohngebäuden – Methodische Grundlage, empirische Erhebung und systematische Analyse, Forschungsprojekt im Forschungsschwerpunkt Energieoptimiertes Bauen (ENOB), gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0327431J.

Berichtszeitraum: 01.12.2008 – 30.06.2016

Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren.

Download der Tools unter

<http://www.enob.info/de/software-und-tools/projekt/details/tek-teilenergiekennwerte-fuer-nichtwohngebaeude-im-bestand/>

1. Auflage

Darmstadt, den 9.01.2017

ISBN: 978-3-941140-38-7

IWU- Bestellnr.: 05/14

INSTITUT WOHNEN UND UMWELT GMBH

Rheinstraße 65

64295 Darmstadt

Germany

Telefon: +49(0)6151/2904-0 / Fax: -97

Internet: www.iwu.de

Im ENOB-Forschungsprojekt *Teilenergiekennwerte von Nichtwohngebäuden*, kurz TEK, wurde eine Methodik zur vereinfachten, energetischen Bilanzierung von Nichtwohngebäuden im Bestand erarbeitet. Den Ist-Verbrauch verstehen, Teilenergieverbräuche bewerten, Schwachstellen erkennen und Einsparpotenziale berechnen, das ist das Ziel von TEK.

TEK erstellt eine Gesamtenergiebilanz von Gebäuden in Anlehnung an die DIN V 18599, verschiedene Vereinfachungen wurden jedoch implementiert, die die energetische Analyse erheblich beschleunigen. Damit wird auch der Tatsache Rechnung getragen, dass in Bestandsgebäuden die Unterlagen zur genaueren Analyse oft fehlen. Außerdem wurde der Bilanzraum der Berechnungen auf nutzungsspezifische Energiebedarfe erweitert, um einen Bedarfs-Verbrauchs-Abgleich vornehmen zu können. Nur so kann das Einsparpotenzial von Optimierungsmaßnahmen plausibel bestimmt werden. Ein dazu passendes *Wirtschaftlichkeitstool*, zur wirtschaftlichen Bewertung von Modernisierungsmaßnahmen auf der Basis der jährlichen Gesamtkosten wurde ebenfalls entwickelt.

Die Methodik von TEK zur Energieanalyse von Nichtwohngebäuden im Bestand und die Erfahrungen aus dem Feldtest sowie weitere Möglichkeiten zur Nutzung von Teilenergiekennwerten in der Schwachstellenanalyse, als objektspezifische Benchmarks und der Verbrauchsstrukturanalyse werden im Abschnitt A vorgestellt. Weitere Werkzeuge zur Bestandsanalyse und zur Auswertung eventuell im Gebäude vorhandener Informationen und Messdaten wurden erarbeitet. Ein Werkzeug zur *Analyse und Interpretation von Lastgangmessungen* (Abschnitt B) gehört ebenso dazu wie ein Werkzeug zur *Hochrechnung von Kurzzeitmessungen* (Abschnitt C) auf den Jahresenergieverbrauch einer Anlage, die in zwei weiteren Abschnitten erläutert werden.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



EnOB

Forschung für
Energieoptimiertes Bauen

A Neue Wege in der Analyse von Nichtwohngebäuden mit der Teilenergiekennwert-Methode

1 Energetische Analyse

Wenn man Kennwerte bildet, dann hat man meist einen Vergleich und eine Bewertung im Sinn. So vergleicht man z. B. den Energieverbrauchskennwert eines Gebäudes mit dem Mittelwert vieler anderer Gebäude, um die Energieeffizienz des Gebäudes an diesem Maßstab zu messen. Diesen Prozess der vergleichenden Bewertung mit einem festgelegten Bezugs- wert oder Vergleichsprozess bezeichnet man als Benchmarking. Ziel ist es meist, anhand dieser Bewertung des Ist-Zustands des Gebäudes mit wenig Aufwand das Energieeinsparpotenzial einzuschätzen.

Bisher ist zur Bewertung der energetischen Effizienz von Bestandsgebäuden das Verbrauchsbenchmarking nach dem Verfahren des Energieverbrauchs- ausweises etabliert. Aufgrund der statistisch abgeleiteten Vergleichs- kennwerte erscheint es geeignet, das Einsparpotenzial eines hinsichtlich der Nutzung homogenen Gebäudeportfolios abzuschätzen.

An einem einzelnen Gebäude ist eine solche Aussage in der Regel aber nicht

Detaillierungsgrad	Voranalyse alle Gebäude	Grobanalyse viele, typische Gebäude	Planung ausgewählte Gebäude
Instrument	Verbrauchskennwerte und Benchmarks	Teilkennwerte für Zonen und Gewerke, Referenzkennwerte	Monatsbilanz, Variantenberechnung
Bilanzraum	gesamtes Gebäude	gesamtes Gebäude und Zonen	Zonen
Methode	EnEV Verbrauchskennwerte	Teilenergiekennwert Methode	- DIN V 18599 - Gebäude- und Anlagensimulation - Planung
	Hochverbraucher mit Potenzial	Analyse der des Potenzials	Planung von Maßnahmen

Bild A1 Einordnung der Teilenergiekennwert-Methode im Ablauf einer Energiebe-
ratung. TEK schließt die Lücke zwischen einfachem Benchmarking und auf-
wändiger Feinanalyse.

möglich, auch wenn das Verfahren ger-
ne dazu benutzt wird. Der Vergleich
kann sich nur auf die Feststellung be-
schränken, dass der Energieverbrauch
des Gebäudes hoch oder niedrig ist im
Vergleich zu einem mittleren Gebäude
der gleichen Kategorie. Warum das so
ist und ob das Gebäude ein Einspar-
potenzial hat oder nicht, kann damit
nicht beurteilt werden.

Alternativ gibt es nur sehr aufwän-
dige, für den Neubau konzipierte
Analyseverfahren, etwa im Rahmen
des Energiebedarfsausweises nach
DIN V 18599, gar eine Gebäude-Si-
mulation oder gleich die Maßnah-
menplanung. Die Anwendung solcher
Verfahren ist in der frühen Phase der
Entscheidungsfindung z. B. im Rahmen
eines energetischen Portfoliomanage-
ments nicht zielführend.

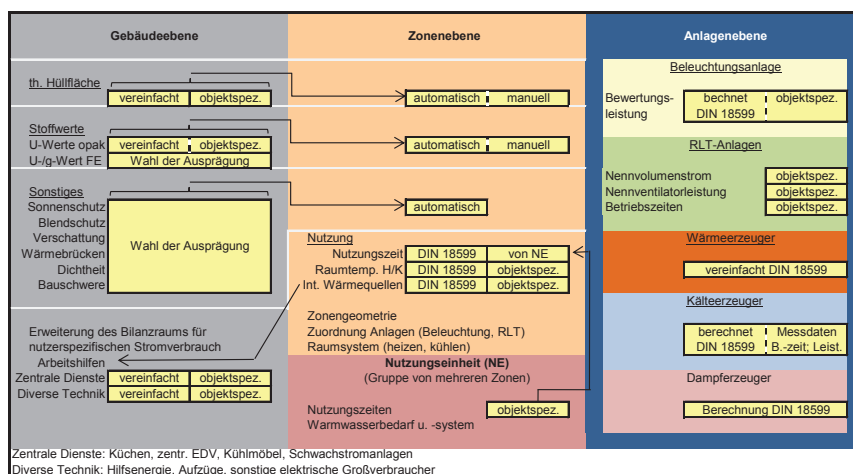


Bild A2 Berechnungsoptionen im TEK-Tool: Bei Bestandsgebäuden fehlen oft Un-
terlagen, Daten aus dem Gebäude müssen deshalb im Berechnungsgang
genutzt werden können.

Autoren

Michael Hörner, Dipl.-Phys., Ener-
gieberater (TU), LEED Accredited
Professional ist wissenschaftlicher
Mitarbeiter im Arbeitsbereich Ener-
gie am IWU Darmstadt.

Christoph Jedek, M.Sc. Bauingeni-
eur ist wissenschaftlicher Mitarbei-
ter im Arbeitsbereich Energie am
IWU Darmstadt.

Dipl.-Ing. Behrooz Bagherian, M.Sc.
Regenerative Energien und Energie-
effizienz, ist wissenschaftlicher Mit-
arbeiter im Arbeitsbereich Energie
am IWU Darmstadt.

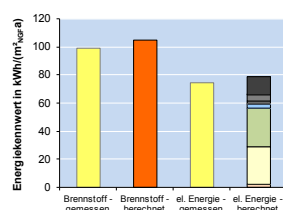
Dipl.-Ing. Michael Grafe, Jahrgang
1974, ist wissenschaftlicher Mitar-
beiter im Arbeitsbereich Energie am
IWU Darmstadt.

Denn oft sind über Bestandsgebäude gar keine Unterlagen mehr verfügbar, aus denen Daten im erforderlichen Detaillierungsgrad entnommen werden könnten.

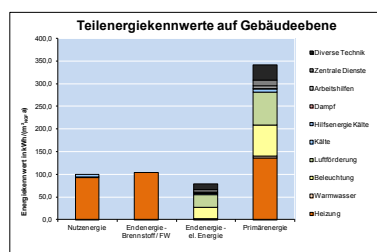
Wie kann diese Lücke in den Instrumenten und Methoden geschlossen werden? Wie kann man mit vertretbarem Analyseaufwand zu aussagefähigen Ergebnissen einer Energieberatung auch bei Nichtwohngebäuden im Bestand kommen? Sind Energiekennwerte geeignet, um Aussagen über das Energiesparpotenzial eines Gebäudes zu treffen? Das waren Ausgangsfragen beim Projekt TEK (vgl. **Bild A1**). Speziell auf die energetische Analyse und Bewertung von bestehenden Nichtwohngebäuden zugeschnittene, vereinfachte Methoden wurden deshalb im TEK-Projekt entwickelt und erprobt (vgl. **Bild A2**). Die Gesamtenergiebilanz ist angelehnt an die DIN V 18599, es werden jedoch im Rechenkern vereinfachte Algorithmen zur Aufteilung der Gebäudehülle auf die Nutzungszonen in der Mehrzonenbilanz aus dem ebenfalls Excel-gestützten Tool EnerCalc¹ angewendet. Auch Beleuchtungssysteme und Anlagen der technischen Gebäudeausrüstung können vereinfacht und unter Nutzung von im Gebäude ablesbaren technischen Daten abgebildet werden. Die Bilanzgrenze wird beim Strombedarf erweitert, um auch nutzungsspezifische Energiebedarfe wie Arbeitshilfen, zentrale Einrichtungen oder diverse Techniken in die Analyse einbeziehen zu können. Außerdem können Nutzungsparameter in zwei Berechnungsmodi eingegeben werden: Im Modus „DIN V 18599“ werden die Standardnutzungsprofile der DIN V

18599-100 zugrunde gelegt, im Modus „Objektspezifisch“ können z. B. Nutzungszeiten, Raumtemperaturen und interne Wärmequellen, wie im Objekt vorgefunden, eingegeben werden. Je nachdem, ob Schnelligkeit oder Genauigkeit der Energieanalyse im Vordergrund stehen, können also eher die vereinfachten oder die objektspezifischen Berechnungseinstellungen gewählt werden. Eine detaillierte Beschreibung der Methodik von TEK wird mit dem Download der Tools geliefert¹. Grundlage für eine realistische Berechnung von Einsparpotenzialen ist unter anderem ein Bedarfs-Verbrauchs-Abgleich im Ist-Zustand, weshalb z. B. auch der gemessene Endenergieverbrauch im TEK-Tool erfasst und wie in **Bild A3** im Ergebnisblatt zum Vergleich dargestellt wird. Beim Bedarfs-Verbrauchs-Abgleich geht es primär darum, die Nutzungsrandbedingungen hinsichtlich Nutzungszeiten, mittleren Raumtemperaturen während der Nutzungszeit und der internen Wärmequellen realistisch abzubilden. Für eine objektspezifische Berechnung des Energiebedarfs sollten deshalb bei der Gebäudeaufnahme die Nutzer befragt werden, Kurzzeitmessungen der Raumtemperaturen durchgeführt

und die Geräteausstattung in exemplarischen Räumen erhoben werden. Dass Nutzer in gut wärmegedämmten Gebäuden tendenziell eher etwas höhere Raumtemperaturen einstellen als in schlecht gedämmten Gebäuden sollte dabei Berücksichtigung finden. Während die räumliche Teilbeheizung ein Spezifikum von Wohngebäuden ist, wird die zeitliche Teilbeheizung auch bei Nichtwohngebäuden in Gestalt von Nacht- und Wochenendabsenkung der Raumtemperaturen nach DIN V 18599 berücksichtigt. Auch die Betriebszeiten von raumlufttechnischen Anlagen und andere objektspezifisch abgebildete Anlagenparameter müssen bei größeren Abweichungen überprüft werden. Die Luftdichtheit der Gebäudehülle oder die Effekte von Wärmebrücken sind bei einer schnellen Analyse eines bestehenden Gebäudes schwer einzuschätzen, können aber nach qualitativer Einschätzung im TEK-Tool variiert werden, ebenso die Bauschwere.



	Brennstoff / Fernwärme	Elektrische Energie
gemessener Verbrauch kWh/(m²a)	99	74
berechneter Bedarf kWh/(m²a)	610	459
Verh. Bedarf/Verbrauch - f _{b/v}	1,06	1,07



	Nutzenergie		Endenergie		Primärenergie	CO ₂ -Emission kg/(m² a)
	Zonen/RLT	Erzeuger	Brennstoff kWh/(m² a)	el. Energie kWh/(m² a)		
Heizung	92,9	104,7	104,7	0,0	136,1	42,6
Warmwasser	1,2	1,2	0,0	2,0	5,1	0,5
Beleuchtung	-	-	-	26,3	68,3	16,6
Luftförderung	-	-	-	28,0	72,9	17,7
Kälte	6,5	8,2	0,0	2,8	7,2	1,8
Hilfsenergie Kälte	-	-	-	0,5	1,4	0,3
Dampf	0,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0
Arbeitshilfen	-	-	-	1,6	4,3	1,0
Zentrale Dienste	-	-	0,0	5,0	13,0	3,2
Diverse Technik	-	-	-	13,1	34,0	8,3
gesamt	100,6	114,0	104,7	79,3	342,2	92,1

Bild A3

Ergebnisdarstellung auf Gebäudeebene im TEK-Tool: Zentrales Element bei der Energieanalyse von Bestandsgebäuden ist der Abgleich von Bedarf und Verbrauch, insbesondere auch als Grundlage für die glaubwürdige Berechnung von Einsparpotenzialen und ihrer Wirtschaftlichkeit.

¹ EnerCalc – Vereinfachte Energiebilanzen nach DIN V 18599, Forschungsprojekt im Forschungsschwerpunkt Energieoptimiertes Bauen (ENOB), gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie.

Luftwechsel durch mechanische Lüftungsanlagen werden gemäß Typenschild eingegeben, bei Fensterlüftung wird angenommen, dass der hygienisch notwendige Mindestluftwechsel eingehalten wird².

Nicht zuletzt ist sicherzustellen, dass die Verbrauchsangaben auch wirklich den Verbrauch des analysierten Gebäudes widerspiegeln und korrekt hinsichtlich Witterung, Leerstand etc. bereinigt sind. Für diese Art der Datenerhebung und -eingabe ist der geübte Blick des erfahrenen Energieberaters erforderlich.

Andere Ursachen für eine systematische Überschätzung insbesondere des Heizenergiebedarfs bei schlecht wärmedämmten Gebäuden sind in der Literatur hinreichend diskutiert und können nur durch empirisch abgeleitete Korrekturfaktoren³ bereinigt werden. Es gibt also eine Fülle von Einflussfaktoren, die bei Bestandsgebäuden oft nur mit unzureichender Genauigkeit ermittelt werden können und Abweichungen des berechneten Bedarfs vom gemessenen Verbrauch verursachen.

Die Ergebnisdarstellung des TEK-Tools umfasst auf der Gebäudeebene (vgl. **Bild A3**) den Vergleich von Bedarf und Verbrauch und die Teilenergiekennwerte der verschiedenen Energiedienstleistungen auf Nutz-, End- und Primärenergieebene sowie die CO₂-Faktoren. Bezugsgröße ist jeweils die konditionierte Nettogrundfläche

2 Die Annahme, dass Nutzer durch die Fensterlüftung den hygienisch notwendigen Luftwechsel einhalten, muss allerdings durch Inaugenscheinnahme vor Ort auf Plausibilität überprüft werden. Die Überschätzung des Luftwechsels durch Fensterlüftung kann auch zur Überschätzung des Heizwärmebedarfs führen.

3 Die Querschnittsanalyse der Ergebnisse aus der Feldphase des TEK-Projekts gibt wichtige Hinweise auf die Größe der Korrekturfaktoren und ihre Abhängigkeit vom energetischen Standard der Gebäude.

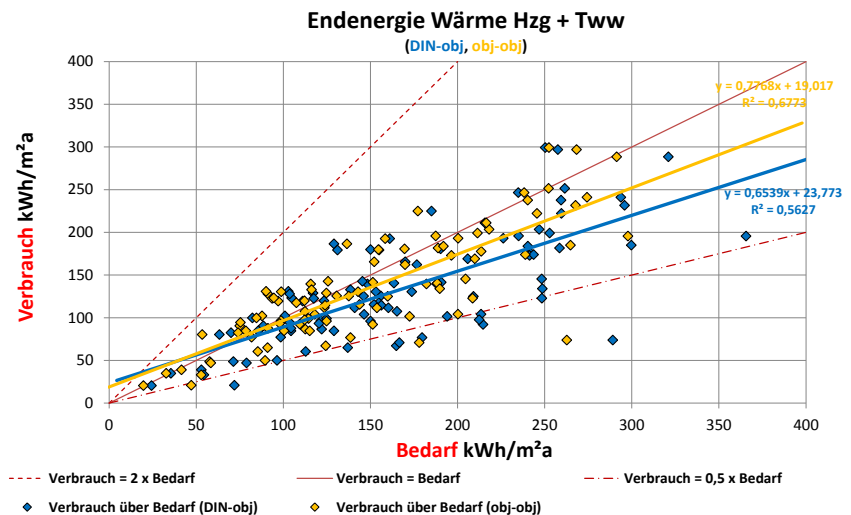


Bild A4 Darstellung des Verbrauchs über dem Bedarf der Gebäude aus der TEK-Datenbasis für Endenergie Wärme in den Berechnungseinstellungen mit Standard-Nutzungsprofilen nach DIN V 18599 (DIN-obj) und objektspezifisch (obj-obj)

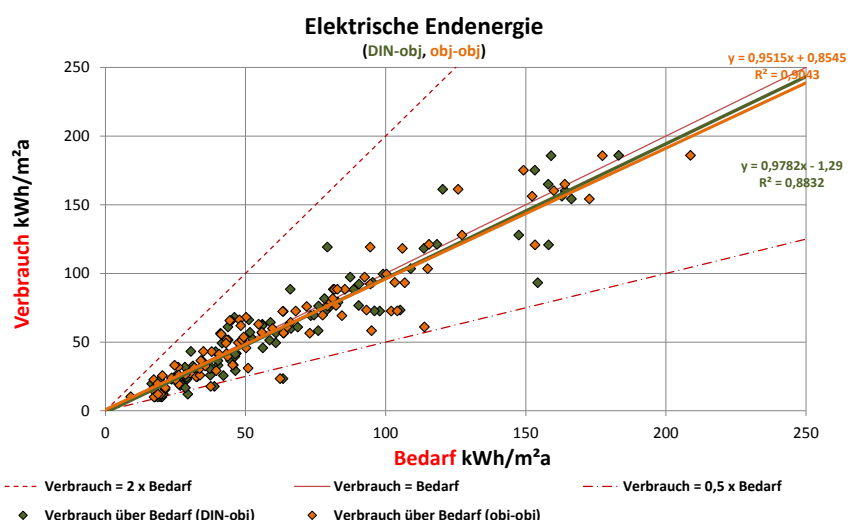


Bild A5 Darstellung des Verbrauchs über dem Bedarf der Gebäude aus der TEK-Datenbasis für elektrische Endenergie in den Berechnungseinstellungen mit Standard-Nutzungsprofilen nach DIN V 18599 (DIN-obj) und objektspezifisch (obj-obj)

(NGF). Auf der Ebene der Nutzungseinheiten und der Zonen werden weitere Teilenergiekennwerte ausgegeben und bewertet. Bezugsgröße hier ist die Netto-Zonenfläche.

Die Gründe für die Abweichungen werden in detaillierten Querschnittsanalysen über die 92 Gebäudedatensätze untersucht, die in der Feldphase des Projekts in den verschiedenen Berechnungseinstellungen analysiert wurden

und inzwischen in der TEK-Datenbank gespeichert sind. Als ein Ergebnis sind in **Bild A4** und **Bild A5** die gemessenen und bereinigten Verbräuche über den jeweils mit dem TEK-Tool berechneten Endenergiebedarfen für Strom bzw. Wärme – berechnet in der Einstellung DIN-obj, also mit Standard-Nutzungsrandbedingungen hinsichtlich der Raumtemperaturen, der Personenbelegung und der Nutzungszeiten nach

DIN sowie objektspezifischer Abbildung von Gebäudehülle und Anlagen – aufgetragen. Der Energiebedarf ist dabei das Maß für die Energieeffizienz der Gebäude und stellt die unabhängige Variable dar. Zum Vergleich sind jeweils auch die berechneten Energiebedarfe in der Berechnungseinstellung obj-obj angezeigt, also mit den in den Objekten erhobenen Nutzungsrandbedingungen.

Bei wenig energieeffizienten Gebäuden – also auf der x-Achse rechts – übersteigt der berechnete Bedarf an Endenergie zur Bereitstellung von Heizwärme und Trinkwarmwasser $q_{b, fu}$ den gemessenen Verbrauch $q_{v, fu}$ deutlich: $q_{v, fu} < q_{b, fu}$ (vgl. **Bild A4**). Bei den eher energieeffizienten Gebäuden – links auf der x-Achse – wird der Verbrauch dagegen tendenziell unterschätzt: $q_{v, fu} > q_{b, fu}$. Die lineare Trendlinie zeigt einen Offset des Verbrauchs bei verschwindendem Bedarf. Die Stichprobe lässt hier allerdings Interpretationsspielraum. Zumindest entspricht es der Erfahrung, dass Gebäude, die in einem

standardisierten Nachweisverfahren einen sehr niedrigen rechnerischen Bedarf zeigen, im Mittel unter realen Betriebsbedingungen und bei realer Nutzung oft deutlich mehr Wärme und damit Brennstoff verbrauchen als erwartet. Die mit objektspezifischen Nutzungsrandbedingungen berechneten Bedarfe zeigen tendenziell die erwartete, bessere Übereinstimmung mit dem Verbrauch.

Überraschend gut ist die Übereinstimmung des elektrischen Endenergiebedarfs mit dem Verbrauch in **Bild A5**, die lineare Trendlinie kommt fast mit der Winkelhalbierenden zur Deckung. Die Streuung um die Winkelhalbierende ist noch beträchtlich, kann aber in der objektspezifischen Berechnungsvariante zu 90 % durch den Energiebedarf erklärt werden. Die für den Wärmebereich charakteristische Abhängigkeit der Abweichung von Bedarf und Verbrauch vom Effizienzstandard des Gebäudes kann hier nicht beobachtet werden. Entscheidend für die im Mittel gute Übereinstimmung von Bedarf

und Verbrauch ist hier die Erweiterung des Bilanzkreises auf die nutzerspezifischen, elektrischen Energiebedarfe im TEK-Tool. Offensichtlich ist der elektrische Energieverbrauch aber auch weniger stark von den Nutzungsparametern abhängig.

Die Auswertung der Verhältnisse $f_{b/v}$ von berechnetem Bedarf und gemessenem Verbrauch für elektrische Energie und Brennstoff/Fernwärme, jeweils in der Berechnungsart „obj-obj“, zeigt für elektrische Energie ein Verhältnis $f_{b/v, el} = 1,10 \pm 0,31$ mit dem Mittelwerte $\mu = 1,1$ und der Standardabweichung $\sigma = 0,31$, d. h. dass der Bedarf den Verbrauch bei elektrischer Energie im Mittel um 10 % überschätzt. Mehr als zwei Drittel der Analysen liegen im Intervall von $\pm 20\%$. Auch bei Brennstoffen / Fernwärme ergibt sich ein ähnliches Bild. Etwa 61 % der Gebäude liegen hier im Intervall $\pm 20\%$ mit einem Verhältnis $f_{b/v, fu} = 1,11 \pm 0,28$. Die Ausreißer, bei denen der berechnete Bedarf den gemessenen Verbrauch deutlich überschätzt – also jenseits eines Fak-

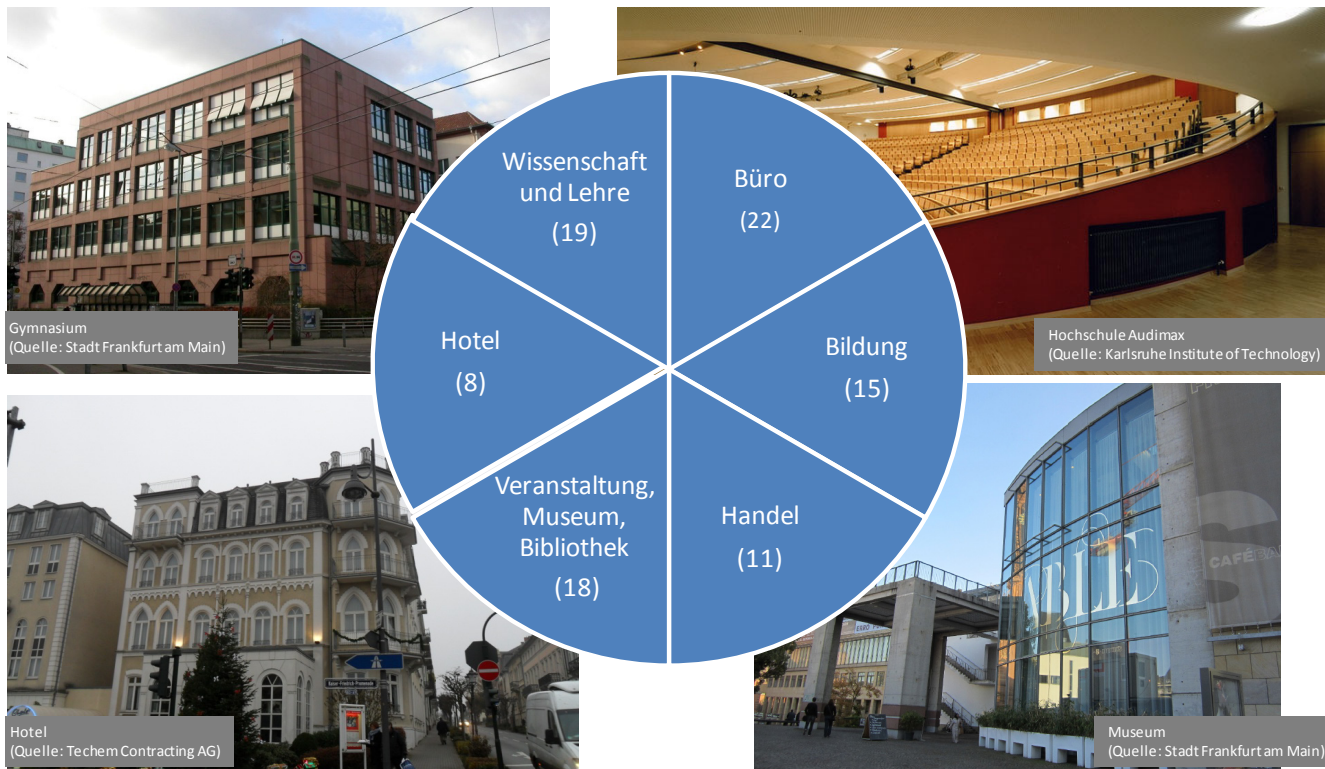


Bild A6 92 Gebäude aus 6 Gebäudekategorien werden in den Querschnittsauswertungen des TEK-Projekts analysiert

tors $f_{b/v}$ von 2,0 – müssen noch genauer untersucht werden.

Die Analyse mit TEK bildet die Struktur des Energiebedarfs differenziert nach Nutzungszonen und Dienstleistungen ab. Dabei werden viele weitere Objekt-Teilenergiekennwerte gebildet. Mit Hilfe von tabellierten Referenz-Teilenergiekennwerten in fünf Energieaufwandsklassen (vgl. **Bild A10**) können diese bewertet und energetische Schwachstellen so leicht identifiziert werden. Die Teilenergiekennwerte werden flächengewichtet auch auf Nutzungseinheiten oder Gebäudeebene aggregiert und bewertet. Ausgehend von der Ist-Analyse können nach dem Bedarfs-Verbrauchs-Abgleich Modernisierungsmaßnahmen zur energetischen Verbesserung bilanziert und Einsparpotenziale plausibel abgeschätzt werden.

Mit den Werkzeugen, die im TEK-Projekt entwickelt wurden, können Gebäudeanalysen deutlich schneller erstellt werden als mit dem Verfahren nach DIN V 18599, das zeigen die Erfahrungen aus der Feldphase. Das Feedback der 7 Projektpartner bestätigt, dass mit TEK unter Nutzung der eingebauten Vereinfachungen die aussagekräftige Ist-Analyse eines durchaus komplexen Gebäudes bei guter Datenlage in 2-3 Tagwerken möglich ist.

In der Feldphase des Projekts wurden sechs Gebäudekategorien abgedeckt (vgl. **Bild A5**): Büro- und Verwaltungsgebäude, Bildungsgebäude, Handelsgebäude, Gebäude für Veranstaltungen, Museen und Bibliotheken, Hotels sowie Gebäude für Wissenschaft und Lehre. Dabei wurden nicht nur die einfachen Gebäude bearbeitet. Für 82 Gebäude konnte eine Qualitätssicherung der Bedarfsberechnung vom IWU durchgeführt werden, in der fehlende Eingaben ergänzt oder unplausible Angaben hinterfragt werden konnten.

2 Schwachstellenanalyse mit Teilenergiekennwerten

2.1 Referenz-Teilenergiekennwerte und Energieaufwandsklassen

Eine Energiebilanz auf Monatsbasis und nach Nutzungszonen und Energiedienstleistungen getrennt liefert naturgemäß sehr viele einzelne Kennwerte. Das ist in TEK nicht anders als in Programmen, die nach DIN V 18599 rechnen und ohne Mühe 150-seitige Erläuterungsberichte produzieren können. Die entscheidende Frage ist deshalb: Wie kann man diese Kennwerte einordnen? Was ist gut, mittel oder schlecht? Lassen sich aus dieser Bewertung Schwachstellen oder gar Einsparpotenziale erkennen? Dies war eine der Leitlinien bei der Entwicklung der TEK-Methodik. Wir haben dabei auf den Erfahrungen aus dem früheren Forschungsprojekt MEG (vgl. [Hörner 2003]⁴) aufgebaut, dessen Ergebnisse in die Richtlinie VDI 3807-4:2008-08⁵ Eingang gefunden haben, mit sehr positiver Resonanz in der Fachöffentlichkeit. Ausgangspunkt für die Schwachstellenanalyse in TEK sind die Objekt-Teilenergiekennwerte des Istzustands eines Gebäudes – kurz Objekt-TEK –, die oben beschrieben wurden. Diese werden mit Referenz Teilenergiekennwerten, kurz Referenz-TEK, verglichen. So kann der Energieaufwand für verschiedene Energiedienstleistungen in den unterschiedlichen Nutzungszonen bewertet werden.

4 [Hörner 2003] Hörner, Michael: *Methodik zur Erfassung, Beurteilung und Optimierung des Elektrizitätsbedarfs von Gebäuden (MEG) – Modul 1.1 Grundlagen, Modul 2.5 Energiematrix* (gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt); Institut Wohnen und Umwelt; Darmstadt 2003

5 VDI 3807 Energie- und Wasserverbrauchskennwerte für Gebäude, Blatt 4 Teilenergiekennwerte elektrische Energie; Verein Deutscher Ingenieure e.V.; Düsseldorf 2008

Die Referenz-TEK werden in fünf Energieaufwandsklassen auf Zonenebene ermittelt, und zwar als

- Teilenergiekennwerte in kWh/(m²a),
- Vollbetriebszeit in h/a und
- spezifische Leistung in W/m².

Nur auf Endenergieebene können die drei Größen sinnvoll in Beziehung gesetzt werden. Sowohl die Objekt-TEK als auch die Referenz-TEK werden mit den gleichen Algorithmen aber mit unterschiedlichen Randbedingungen berechnet.

Die Referenz-TEK wurden differenziert nach den 45 Standardnutzungsprofilen der DIN V 18599-100:2009-10, Teil 10 mit dem Standardklima nach DIN V 18599-10:2007-02 für typische Ausprägungen der Energiedienstleistungen mit dem TEK-Tool berechnet. Für die fünf Energieaufwandsklassen wurden die unterschiedlichen Ausprägungen von Gebäudehülle und Anlagen – wie z. B. Zonengeometrie⁶, U-Werte und g-Werte, Anlagenaufwandszahlen, Regelungsregime – als real feststellbare Qualitäten formuliert und nicht als statistisch festgelegte Grenzen. Referenz-TEK sind so für die Energiedienstleistungen Heizung, Warmwasserbereitung, Beleuchtung, Luftförderung, Klimakälte und Befeuchtung entstanden. Sie bilden Stützstellen zur Definition der Energieaufwandsklassen. Am Beispiel der Beleuchtung (vgl. **Bild A7**) sind die Referenz-TEK für die Nutzungszone

6 Zonengeometrie in Anlehnung an [Knissel 2005] Knissel, Jens: *Methodik zur Erfassung, Beurteilung und Optimierung des Elektrizitätsbedarfs von Gebäuden (MEG) – Modul 2.3: Klimakälte* (gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt); Institut Wohnen und Umwelt; Darmstadt 2005 [Lichtmess 2010] Lichtmess, Markus: *Vereinfachungen für die energetische Bewertung von Gebäuden*; Dissertation am Fachbereich Architektur der Bergischen Universität Wuppertal; Wuppertal 2010

„Einzelbüro“ in den Energieaufwandsklassen „Sehr gering“ mit 10 kWh/m²a, für „Gering“ mit 19 kWh/m²a, für „Mittel“ mit 28 kWh/m²a usw. dargestellt. Die Klassengrenzen werden abgeleitet, indem der jeweilige Abstand zwischen den Referenz-TEK zweier Klassen halbiert wird (vgl. **Bild A8**). Für die Energieaufwandsklasse „Gering“ liegt der Referenz-TEK als Stützstelle bei 19 kWh/m²a, die Klassengrenze nach unten liegt bei der Hälfte des Abstands zur Klasse „Sehr gering“, deren Stützstelle mit 10 kWh/m²a ermittelt wurde, also bei 14 kWh/m²a. Gleichmaßen ergibt sich die Klassengrenze nach oben. Ausgehend von der Zonenebene können Referenz-Teilenergiekennwerte flächengewichtet auch auf andere Bilanzierungsebenen wie die Nutzungseinheiten⁷ oder das ganze Gebäude bzw. auf die Versorgungsbereiche von Anlagen aggregiert werden. So entsteht eine Art Energielabel (vgl. **Bild A9**), das zur Bewertung der am untersuchten Gebäude ermittelten Objekt-TEK auf den unterschiedlichen Aggregationsebenen angewendet werden kann. Die Randbedingungen für die Berechnung der Referenz-TEK der Energieaufwandsklasse „Gering“ wurden in Anlehnung an das Referenzgebäude der EnEV 2009 gesetzt, die für „Sehr gering“ an fortgeschrittenen Effizienztechniken wie z. B. passivhaustauglichen Komponenten orientiert.

⁷ Eine Nutzungseinheit in TEK wird aus einem Teil eines Gebäudes gebildet, der im Sinne der Berechnung einheitliche Nutzungszeiten aufweist, die sich aus der praktisch vorkommenden einheitlichen Nutzung von Haupt- und Nebenflächen ergeben. Eine Nutzungseinheit besteht in der Regel aus mehreren Zonen nach DIN V 18599, z. B. einer Bürozone, Verkehrsflächen, Besprechungsbereichen und Lagerflächen. Die Ebene der Nutzungseinheiten wird in TEK benutzt, um Parameter wie Nutzungszeiten und Warmwasserbedarf objektspezifisch einzugeben.

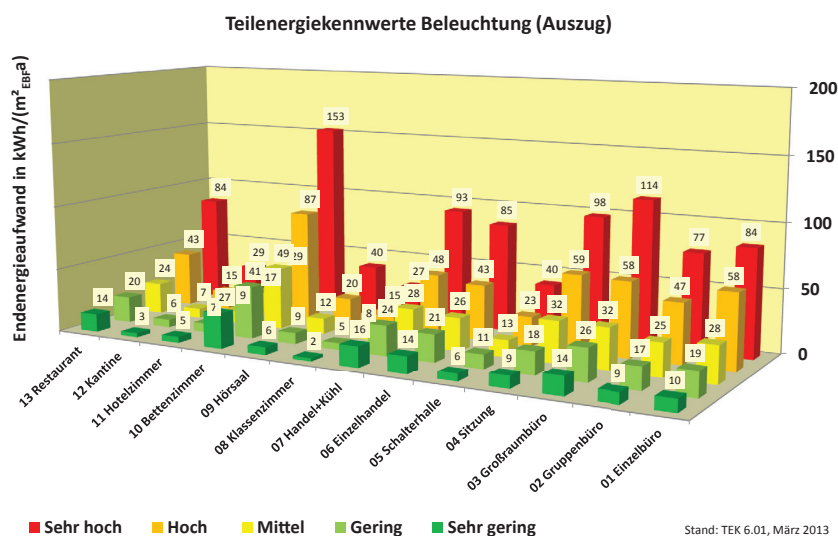


Bild A7 Referenz-Teilenergiekennwerte am Beispiel der Energiedienstleistung Beleuchtung für die fünf Energieaufwandsklassen und ausgewählte Nutzungszonen

2.2 Kennwertanpassung

Die Referenz-TEK sind für spezielle Randbedingungen berechnet. Weichen die Randbedingungen des zu bewertenden Gebäudes hiervon stark ab, führen die Referenz-TEK nicht mehr zu einer geeigneten Bewertungsskala. Um dennoch zu einer plausiblen Bewertung des Energieaufwands zu kommen, werden die Referenz-TEK angepasst. Objekt-TEK bleiben dabei unverändert, da sie ja den tatsächlichen Zustand des Gebäudes beschreiben oder den geplanten Zustand, wenn es sich um die Berechnung einer Sanierungsvariante handelt.

Referenz-TEK werden im TEK-Tool in folgenden Fällen angepasst:

- Anpassung an den tatsächlichen Energieträger:
Wenn sich die Wertigkeit eines Endenergieträgers in einer Energiedienstleistung des Gebäudes von der Wertigkeit des Endenergieträgers unterscheidet, der zu Berechnung der Referenz-TEK angenommen wurde, muss eine Anpassung vorgenommen werden. So sind die Referenz-TEK für die Energiedienst-

leistung Heizung unter der Annahme berechnet worden, dass die Wärme in Heizkesseln unterschiedlicher Güte mit Erdgas erzeugt wird. Wenn das analysierte Gebäude aber beispielsweise mit einer elektrisch betriebenen Wärmepumpe beheizt wird, der Endenergieträger also elektrische Energie ist, dann würde der Vergleich der Objekt-TEK mit den Referenz-TEK unsinnige Ergebnisse liefern. Deshalb werden die tabellierten Kennwerte im Verhältnis der Primärenergiefaktoren f_p der Energieträger angepasst.

- Anpassung an die Gebäudegeometrie:

Die Referenz-TEK Heizung sind für ein Gebäude mit einer Netto-Grundfläche von 5.000 m² und einem A/V-Verhältnis von ca. 0,32 m⁻¹ berechnet. Weist das zu bewertende Gebäude eine andere Gebäudegröße bzw. ein anderes A/V-Verhältnis auf, müssen die Kennwerte angepasst werden. Verwendet wird hier ein in [Lichtmeß 2010]⁶ entwickeltes Verfahren, in der für die Luxemburger Energie-

einsparverordnung aufbereiteten Form.

- Anpassung an tatsächliche Nutzungszeiten:
Unterscheidet sich die Nutzungszeit des Gebäudes stark von den Standard-Nutzungsprofilen werden die Referenz-TEK über die Vollbetriebszeiten angepasst. Dies gilt für die Energiedienstleistungen Heizung, Beleuchtung, Luftförderung mit Luftaufbereitung und Kühlung.
- Anlagenkonfiguration:
Bei der Luftförderung wird eine Anpassung der tabellierten Teilenergiekennwerte vorgenommen, wenn es sich bei der RLT- Anlage um eine reine Abluftanlage handelt. Es wird angenommen, dass der Referenz-TEK Luftförderung im Falle einer Abluftanlage bei 60 % des tabellierten Wertes für Zu- und Abluftanlagen liegt.

2.3 Bewertung mit Teilenergiekennwerten

Im TEK-Tool werden die Energiedienstleistungen Heizung, Warmwasserbereitung, Beleuchtung, Luftförderung, Klimakälte und Befeuchtung auf Zonenebene bewertet. Die Kennwerte werden auf Endenergieebene angegeben, die auf die Zonenfläche bezogen sind. Die Bewertung erfolgt durch zwei Vergleiche (vgl. **Bild A10**). Zum einen wird angegeben, in welcher Energieaufwandsklasse der Teilenergiekennwerte des Ist-Zustands liegt. Dies wird auch durch eine farbliche Markierung verdeutlicht.

Zum anderen werden die Teilenergiekennwerte, die spezifische installierte Leistung und die Vollbetriebszeiten des Ist-Zustandes den Referenz-Teilenergiekennwerten für die Energieaufwandsklasse „gering“ gegenüber gestellt. Die Aufwandsklasse „gering“ repräsentiert einen üblichen Neubaustandard und gibt einen Anhaltspunkt, welcher Zu-

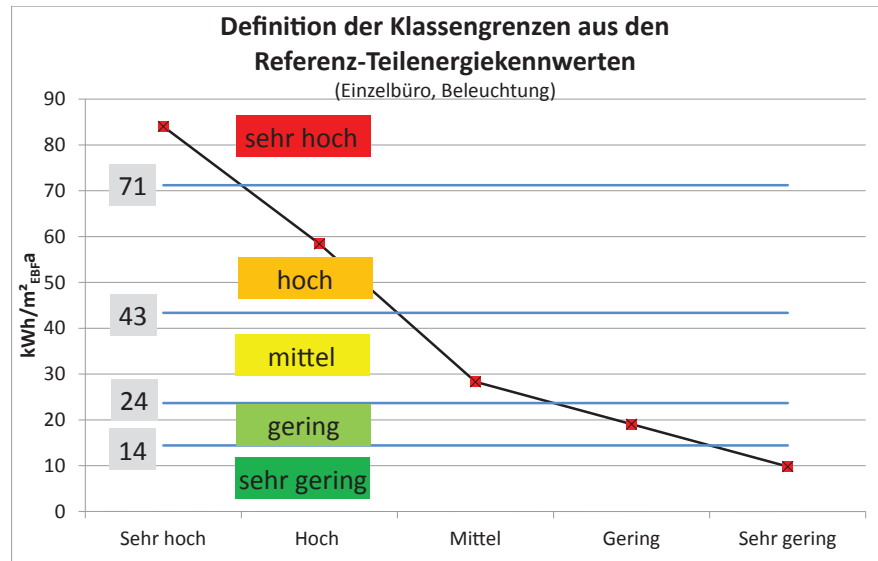


Bild A8 Klassengrenzen der Energieaufwandsklassen am Beispiel der Energiedienstleistung Beleuchtung für das Nutzungsprofil Einzelbüro

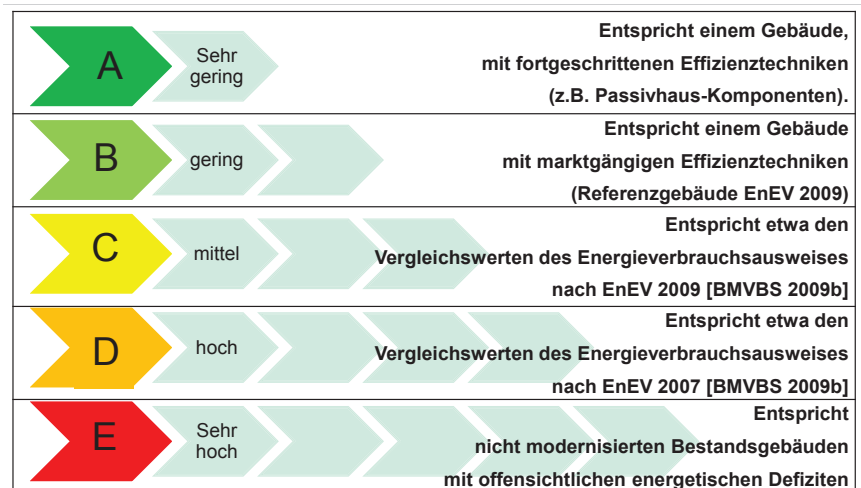


Bild A9 Die Effizienzstandards von Baukörper und Anlagentechnik in den fünf Energieaufwandsklassen sind auf unterschiedlichen Skalierungsebenen anwendbar: Nutzungszonen, Nutzungseinheiten, Gebäude, Anlagenversorgungsgebiete.

stand im Rahmen einer ambitionierten Modernisierung erreichbar sein könnte. Die Differenzierung des Vergleichs in Energie, Leistung und Zeit kann weitere Hinweise auf die Ursache hoher Kennwerte geben. So liegt möglicherweise eine Überdimensionierung einer Anlage vor, wenn der Leistungskennwert den Referenz-Kennwert deutlich überschreitet, oder der Grund liegt eher in einer nicht an den Bedarf angepassten Regelung, wenn die Vollbetriebszeit weit über dem Referenzwert liegt.

3 Objekt-spezifische Benchmarks

Die Einschätzung der energetischen Effizienz bestehender Nicht-Wohngebäude nach dem Verfahren des Energieverbrauchsausweises nach [BMVBS 2009]⁸ verursacht die bereits in Kap. 1 dargestellten Schwierigkeiten. Die

⁸ [BMVBS 2009] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Bekanntmachung der Regeln für die Energieverbrauchskennwerte und der Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand vom 30. Juli 2009; Berlin, 2009

3.2 Beleuchtung										
Nr. und Name	Std.-nutzung	Fläche m²	Nr. Beleuch- tungsanlage	Ist-Wert Zone (Endenergie)				Vergleichswert - gering		
				TEK-Bewert.	kWh/(m²a)	W/m²	h/a	kWh/(m²a)	W/m²	h/a
1) Einzelbüro Nord	01 Einzelbüro	463	1	Gering	17,7	12,4	1428,4	20,0	17,2	1.160
2) Saal-Vorraum	04 Sitzung	39	7	Sehr gering	0,3	5,8	59,4	1,8	15,6	118
3) Einzelbüro Süd	01 Einzelbüro	561	1	Gering	18,0	12,4	1457,0	20,0	17,2	1.160
4) Verkehrsflächen	19 Verkehrsflä	265	2	Hoch	15,9	8,8	1800,0	2,4	4,5	537
5) Foyer	19 Verkehrsflä	87	5	Mittel	8,5	14,2	598,0	2,6	4,5	575
6) WC, Sanitär	16 WC, Sanitär	76	6	Mittel	18,5	14,9	1246,4	3,5	9,0	390
7) Lager / Technik / Archiv	20 Lager, TecI	558	3	Hoch	3,6	6,1	593,6	1,3	3,0	423
8) Saal	04 Sitzung	169	4	Gering	0,7	9,4	71,0	0,7	15,6	43
9) Serverraum	21 Rechenzen	5	3	Sehr gering	19,9	6,1	3276,0	29,2	14,6	1.996
10) Nebenflächen	18 Nebenfläch	15	3	Hoch	1,9	6,1	308,2	1,1	3,0	365

Bild A10 Schwachstellenanalyse mit Teilenergiekennwertbewertung im TEK-Tool am Beispiel der Beleuchtung

Grundgesamtheit der Verbrauchswerte, die zur Bildung der Mittelwerte herangezogen wurden, hat eine so erhebliche Streuung (vgl. [ARGE 2009]⁹), dass ein Einsparpotenzial an einem einzelnen Gebäude daraus nicht abgeleitet werden kann. Eine Erhöhung der Anzahl der Gebäudekategorien löst dieses Problem nur bedingt. Neben dem hohen Aufwand zur Bildung der statistischen Mittelwerte für immer mehr Gebäudekategorien, ergibt sich bei der praktischen Anwendung die Schwierigkeit, dass eine zweifelsfreie Zuordnung oft nicht möglich ist. Außerdem gibt es inzwischen eine ganze Reihe von Benchmarks aus verschiedenen Pools, die ganz unterschiedlich ausfallen und statistisch nicht abgesichert sind. Welche soll man anwenden?

In dem hier vorgestellten neuen Ansatz werden Vergleichskennwerte oder Benchmarks aus tabellierten Referenz-Teilenergiekennwerten synthetisiert, wobei – objektspezifisch – die gleiche Nutzungsstruktur und Konditionierung wie beim zu bewertenden Gebäude angesetzt wird. Die im TEK-Projekt erzeugten Referenz-TEK werden dazu genutzt. Das Verfahren ähnelt damit dem Verfahren des Referenzgebäudes beim

Energiebedarfsausweis für Neubauten. Das zu bewertende Gebäude wird grob in unterschiedliche Nutzungsbereiche nach DIN V 18599-10 aufgeteilt. Ausgehend von dieser Nutzungsstruktur des Gebäudes und ergänzenden Angaben zur Anlagentechnik, wie z. B. dem Umfang der mechanischen Belüftung oder Klimatisierung, werden jeder Nutzungszone und jeder Energiedienstleistung die entsprechenden, tabellierten Referenz-TEK zugewiesen, z. B. für ein Anforderungsniveau, das den Spezifikationen der Energieaufwandsklasse „Mittel“ (vgl. **Bild A11**) entspricht. Aus diesen wird der objektspezifische Vergleichskennwert oder Benchmark synthetisiert. Auch hier müssen die Referenz-TEK eventuell an andere Energieträger, Gebäudegeometrien, Nutzungszeiten oder Anlagenkonfiguration angepasst werden.

Durch die Verwendung objektspezifischer Benchmarks kann die Aussagekraft einer Bewertung der Verbrauchskennwerte erheblich verbessert werden. Sind die Anlagen gegenüber der Spezifikation der Referenz-Energieaufwandsklasse über- oder unterdimensioniert oder werden sie besser oder schlechter betrieben, dann kann dies durch den Vergleich mit dem objektspezifischen Benchmark erkannt werden. Natürlich müssen dazu die Verbrauchskennwerte hinsichtlich Wit-

terung und Leerstand bereinigt werden, genauso wie beim bisherigen Verfahren mit Vergleichskennwerten.

Nach guten Erfahrungen mit objektspezifischen Benchmarks für Bestandsgebäude in der Energiesparverordnung Luxembourg wird das System nun auch im Nutzungsprofil Bestand Büro- und Verwaltungsgebäude (Version 2013), Kriterium BBV13-01 Treibhauspotenzial/Nutzungsphase der Deutschen Gesellschaft für nachhaltiges Bauen angewendet.

Die mit Referenz-TEK der Klasse „Mittel“ synthetisierten Benchmarks für Gebäude verschiedener Gebäudekategorien bei einer typischen Verteilung der Nutzungszonen zeigen gute Übereinstimmung mit den Vergleichswerten nach EnEV 2009 aus [BMVBS 2009]⁹, gleichermaßen passen die Referenz-TEK der Klasse „Hoch“ recht gut zu den Vergleichswerten der EnEV 2007. Es entsteht also zumindest im statistischen Mittel kein problematischer Bruch mit den Grundzügen der bisherigen Bewertung der energetischen Effizienz von Gebäuden. Im Einzelfall eines konkreten Gebäudes kann es aber durchaus zu ganz anderen Bewertungen kommen, denn dort bilden die Referenz-TEK die tatsächliche Nutzungsstruktur und die Konditionierung ab.

Für den Vergleich in **Bild A12** und

⁹ [ARGE 2009] ARGE Benchmark: Benchmarks für die Energieeffizienz von Nichtwohngebäuden, Vergleichswerte für Energieausweise; BBSR-Online-Publikation Nr. 09/2009; Berlin, 2009

Bild A13 wurden virtuelle Gebäude definiert, deren Kennwerte des Strom- bzw. Brennstoffverbrauchs den Vergleichswerten der EnEV 2007 entsprechen. Für die Synthese der objektspezifischen Benchmarks wurden zunächst die typischen Flächenanteile der Hauptnutz-, Nutz- und Nettogrundfläche aus [BMVBS 2009] und [BKI 2005]¹⁰ herangezogen. Auswertungen der in der TEK-Feldphase untersuchten Gebäude ergaben die mittleren Anteile der Nutzungszonen für die sechs Gebäudekategorien. Außerdem wurden aus den Gebäudedaten vorläufige Korrekturfaktoren für den Bedarfs-Verbrauchs-Abgleich gewonnen.

4 Verbrauchsstrukturanalyse

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit von Teilenergiekennwerten stellt die Verbrauchsstrukturanalyse dar. Dazu wird der gemessene Endenergieverbrauch eines Gebäudes, so wie er ist, allerdings entsprechend nach Witterung und Leerstand bereinigt, mit Hilfe von Teilenergiekennwerten rechnerisch reproduziert und abgeglichen. Steht das Modell, dann ergibt sich das sogenannte „strategische Einsparpotenzial“ im Vergleich zu einer Variante, in der alle Teilenergiekennwerte auf den Referenz-TEK der Energieaufwandsklasse „Gering“ gesetzt werden. Diese Variante ergäbe sich, wenn alle Hüllenbauteile, die Beleuchtung und die technischen Anlagen auf einen heutigen Neubaustandard modernisiert werden könnten.

In einem sehr einfachen Modells des Gebäudes werden Zonenflächen und Nutzungsprofile grob abgebildet wie sie derzeit im DGNB-Nutzungsprofil Bestand Büro- und Verwaltungsgebäu-

¹⁰ [BKI 2005] BKI Baukosten 2005, Teil 1 Statistische Kostenkennwerte für Gebäude; BKI Baukosteninformationszentrum (Hrsg.); Stuttgart 2005

DGNB	Nutzungszonen	Hauptnutzung	Heizung	Warmwasser	Beleuchtung	Luftförderung	Kühlkälte	Arbeitshilfen
BBV ENV 2.1					kWh/(m²a)			
1 Einzelbüro		X	130,2	13,9	28,3	16,3	12,9	10,5
2 Gruppenbüro		X	132,0	13,9	25,5	16,3	12,4	10,5
3 Großraumbüro		X	137,3	13,9	31,9	24,4	15,9	15,0
4 Besprechung/Sitzungszimmer/Seminar		X	200,3	0,0	32,4	60,9	21,2	2,0
5 Schalterhalle		X	147,7	0,0	13,2	8,1	7,3	6,0
6 Einzelhandel/Kaufhaus (ohne Kühlprodukte)		X	154,4	8,6	25,7	21,0	13,3	7,2
7 Einzelhandel/Kaufhaus (mit Kühlprodukten)		X	163,7	8,6	28,2	21,0	16,5	25,5
8 Klassenzimmer (Schulen)		X	143,0	35,9	7,6	22,5	11,7	4,0
9 Hörsaal, Auditorium		X	213,4	5,0	12,1	67,5	24,1	3,6
10 Bettenzimmer		X	198,5	178,7	48,5	54,6	19,4	8,8
11 Hotelzimmer		X	142,9	157,0	9,5	20,9	8,5	16,1
12 Kantine (Essbereich)		X	159,0	147,8	7,3	34,3	17,6	2,5
13 Restaurant (Essbereich)		X	216,2	176,4	24,4	68,9	27,1	4,2
14 Gewerbeküchen (Kochen mit Strom)		X	656,8	0,0	91,2	335,0	216,5	540,0
15 Gewerbeküchen - Vorbereitung, Lager		X	170,3	0,0	44,3	55,8	25,3	54,0
16 WC und Sanitärräume			233,0	0,0	15,6	60,9	12,1	0,0
17 Sonstige Aufenthaltsräume			146,7	0,0	19,6	28,4	11,1	2,0
18 Nebenflächen ohne Aufenthaltsräume			130,2	0,0	1,4	0,6	0,5	0,0
19 Verkehrsfläche			122,7	0,0	7,9	0,0	0,7	0,0
21 Verkehrsfläche ohne Tageslicht			122,7	0,0	11,9	0,0	0,7	1,0
22 Lager			149,7	0,0	0,6	0,6	1,9	0,0
23 Lager mit Leseaufgaben			149,7	0,0	11,9	0,6	1,9	1,0
24 Serverraum in Rechenzentren		X	46,9	0,0	59,6	14,2	247,4	657,0
25 Gewerbehalle (grobe Arbeiten)		X	92,3	31,8	17,7	31,3	14,6	70,0
26 Gewerbehalle (feine Arbeiten)		X	109,4	31,8	26,1	31,3	21,8	70,0
27 Zuschauerbereich		X	280,7	0,0	6,1	75,0	23,1	0,0
28 Theater - Foyer		X	177,5	0,0	7,1	46,9	11,0	0,0
29 Bühne		X	208,8	0,0	40,8	0,6	11,0	0,0
30 Messe/Kongress		X	195,9	0,0	6,3	14,4	12,1	1,8
31 Ausstellungsräume und Museum		X	190,5	0,0	9,5	21,9	6,9	0,0
32 Bibliothek - Lesesaal		X	148,7	0,0	50,7	42,0	26,3	0,0
33 Bibliothek - Freihandbereich		X	125,7	0,0	23,3	10,5	7,0	0,0
34 Bibliothek - Magazin und Depot		X	162,9	0,0	1,9	15,8	3,2	0,0
35 Sporthalle		X	42,2	37,1	32,8	10,5	19,8	0,0
36 Parkhäuser/Tiefgaragen (Privatnutzung)			0,0	0,0	0,7	11,2	0,0	0,0
37 Parkhäuser/Tiefgaragen (öffentlich)			0,0	0,0	7,2	56,2	0,0	0,0
38 Saunabereich		X	293,9	107,1	35,5	95,8	47,9	182,5
39 Fitnessraum		X	209,6	135,3	44,5	93,1	38,6	8,8
40 Labor		X	402,3	13,9	44,6	119,5	25,3	27,0
41 Behandlungsraum		X	206,1	5,0	47,7	40,6	21,8	8,8
42 Spezialpflegebereiche		X	1143,6	5,0	82,7	327,8	73,8	83,2
43 Flure (Pflegebereich)			420,5	5,0	30,7	109,3	15,3	0,0
44 Arztpraxen		X	193,8	13,9	27,1	21,1	14,1	6,3
45 Lagerhalle		X	88,2	5,0	35,9	4,8	0,0	0,0
46 Wohnen (EFH)		X	100,5	19,3	47,9	10,9	0,0	24,5
47 Wohnen (MFH)		X	89,7	24,0	49,2	10,9	0,0	36,8

Bild A11 Auszug aus der Liste der Referenz-Teilenergiekennwerte (Version TEK-5.6)

de [DGNB 2013]¹¹ zur Bewertung erprobt werden (vgl. **Bild A11**). Anzugeben ist die Gebäudekategorie und die Nettogrundfläche des Gebäudes, die automatisch über typische Flächenverhältnisse z. B. in [BMVBS 2009]⁸ auf Hauptnutzflächen, Nebennutzflächen, Verkehrs- und Funktionsflächen aufgeteilt wird. Diesen Flächenarten werden die Profile für die typischen Nutzungen im Gebäude zusammen mit einem grob geschätzten prozentualen Anteil dieser Nutzung an der Flächenart zugewiesen. Die aufwändige Arbeit der Flächenermittlung nach Nutzungszonen und der Zuordnung von Hüllflächenanteilen entfällt.

Im zweiten Schritt wird die Anlagen-

ausstattung per Mausklick zugeordnet und die Qualität der Energiedienstleistungen von der Heizung über die Beleuchtung bis zu den zentralen Diensten bewertet. Dazu ist eine Inaugenscheinnahme des Gebäudes vor Ort erforderlich.

¹¹ [DGNB 2013] Nutzungsprofil Bestand Büro- und Verwaltungsgebäude (Version 2013), Kriterium BBV13-01 Treibhauspotenzial/Nutzungsphase; Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen (DGNB); Stuttgart 2013

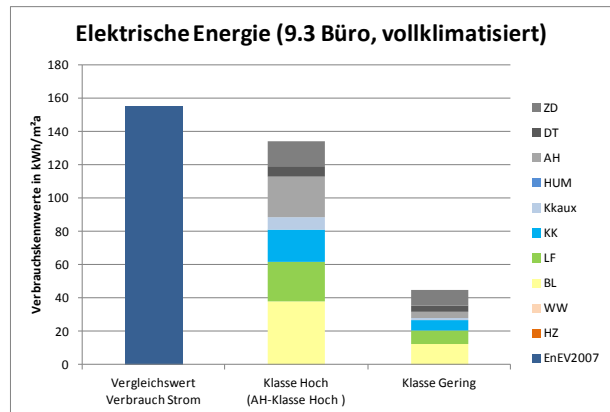
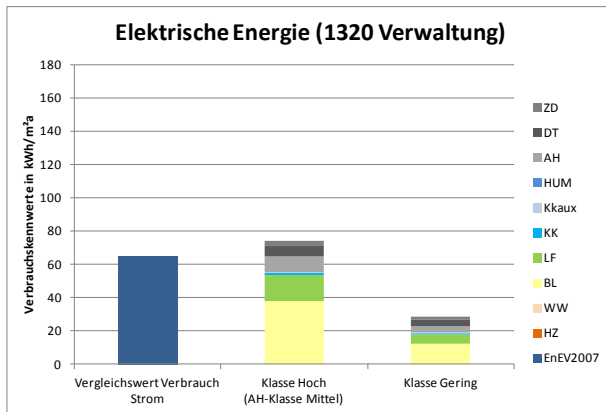


Bild A12 Objektspezifische Benchmarks für elektrische Energie mit Referenz-TEKs der Energieaufwandsklasse „Hoch“ nach TEK-6.2 im Vergleich zu den Mittelwerten nach EnEV 2007 in [BMVBS 2009]8 für ein durchschnittliches öffentliches Verwaltungsgebäude mit höherer technischer Ausstattung (Tab. 2.1, BWZK 1320) und ein privates Bürogebäude mit Vollklimatisierung (Tab. 2.2, lfd. Nr. 9.3)

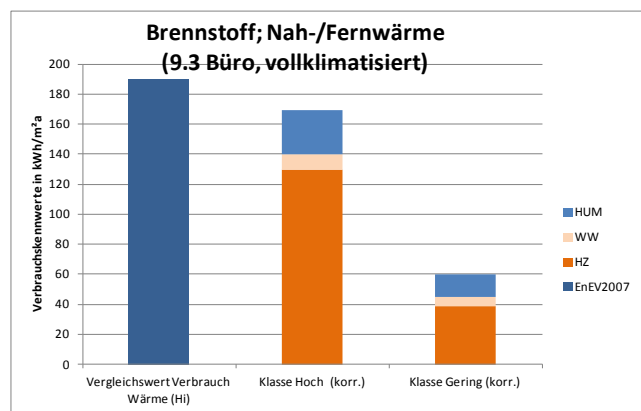
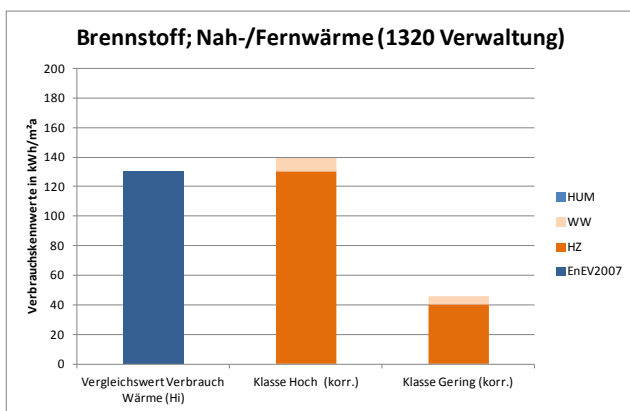


Bild A13 Objektspezifische Benchmarks Brennstoff / Nah- und Fernwärme der Energieaufwandsklasse „Hoch“ nach TEK-6.2 im Vergleich zu den Mittelwerten nach EnEV 2007 in [BMVBS 2009]8 für ein durchschnittliches öffentliches Verwaltungsgebäude mit höherer technischer Ausstattung (Tab. 2.1, BWZK 1320) und ein privates Bürogebäude mit Vollklimatisierung (Tab. 2.2, lfd. Nr. 9.3)

Die Bewertung erfolgt mit Hilfe der Referenz-TEK (vgl. **Bild A7** für das Beispiel Beleuchtung). Dabei ist das Problem zu lösen, welche Merkmale der Gebäudehülle bzw. einer Anlage reproduzierbar und möglichst intersubjektiv zur Einordnung in welche Energieaufwandsklasse führen. In der Regel sind es viele Faktoren, die die Qualität einer Anlage beeinflussen können. Dazu wurden im Forschungsprojekt Verbrauchsstrukturanalyse¹² mit Hilfe des TEK-Tools in umfangreichen Parameterstudien

Kombinationen von Einflussfaktoren variiert und ihr Einfluss auf und ihre Relevanz für die Teilenergiekennwerte ermittelt.

Bewertungshilfen wurden damit erstellt, wie in **Bild A14** am Beispiel der Beleuchtung.

Erste Erfahrungen mit dem Prototypen zeigen, dass eine Verbrauchsstrukturanalyse in einem durchschnittlichen

Verwaltungsgebäude in zwei bis drei Stunden durchgeführt werden kann. Das Werkzeug ist dafür gedacht, größere Portfolios mit vertretbarem Aufwand zu bewerten, Prioritäten für die energetische Modernisierung der einzelnen Gebäude zu setzen und ein strategisches Einsparpotenzial abzuschätzen.

¹² Entwicklung, Erprobung und Einführung einer differenzierten Verbrauchsstrukturanalyse für bestehende Nichtwohngebäude; Forschungsprojekt des IWU im Forschungsfeld Energie/Nichtwohngebäude; gefördert vom Hessischen Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUEL) mit Mitteln aus dem EU-Programm RWB-EFRE

Ermittlung Teilenergiekennwerte Zonen					H2-Heizung		WW-Warmwasser		BL-Beleuchtung		LF-Luftförderung		KK-Kühllast		AH-Arbeitsplätze	
Nutzungen	Nr.	[m²]	%	Bemerkungen	elektr.	Mittel	elektr.	Mittel	elektr.	Mittel	elektr.	Mittel	elektr.	Mittel	elektr.	Mittel
Hauptnutzflächen		4.347	57%													
Einzelbüro	1	3.261	75%		☐ 100%	122,4	☐ ☐	11,4	☐ 100%	Gering	19,1	☐	☐			MB
Großraumbüro (ab sieben Arbeitsplätzen)	3	217	5%	Polizei	☐ 100%	129,4	☐ ☐	11,4	☐ 100%	Mittel	31,9	☐ 100%	Mittel	33,9		MB
Besprechung/Sitzungszimmer/Seminar	4	435	10%		☐ 100%	192,1	☐ ☐	3,0	☐ 100%	Sehr hoch	37,6	☐				MB
Besprechung/Sitzungszimmer/Seminar	4	435	10%	Parlament	☐ 100%	192,1	☐ ☐	3,0	☐ 100%	Sehr hoch	37,6	☐ 100%	Mittel	84,6		MB
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				
					☐		☐		☐			☐				

B Lastgangmessungen zur Analyse von Energieeinsparpotenzialen in Gebäuden

Viele Untersuchungen zeigen, dass der Energieverbrauch gerade in neuen oder sanierten Gebäuden prognostizierte Planungswerte oder gebäudetypen- und -altersspezifische Benchmarks oft überschreitet und das z.T. in erheblichem Maße. Daraus ergibt sich grundsätzlich ein durch Betriebsoptimierung erschließbares Energieeinsparpotenzial. Aufgrund der in der Regel komplexeren Energieverbrauchsstruktur von Nichtwohngebäuden – neben dem Heizenergieverbrauch spielt hier der Strombedarf für Beleuchtung, Lüftung, Klimatisierung und Arbeitshilfen eine große Rolle – kann das Einsparpotenzial in diesem Gebäudesegment nicht ohne weiteres identifiziert werden. Somit fehlt eine Entscheidungsgrundlage für Verbesserungs- oder Sanierungsmaßnahmen, die sich von der Gebäudehülle über die technische Gebäudeausrüstung bis hin zur Regelung bzw. zu Mensch-Gebäude-Schnittstellen erstrecken können. Dabei besitzen Energieeinsparmaßnahmen gerade in Nichtwohngebäuden oftmals eine nennenswerte wirtschaftliche Dimension.

Eine Möglichkeit zur genaueren Analyse des Energieverbrauchs ist das Monitoring und die damit einhergehende kontinuierliche energetische Betriebsoptimierung [4]. Dies erfordert jedoch je nach Gebäudegröße und -nutzung eine entsprechende Menge an Datenpunkten, die durchgehend erfasst und gespeichert werden müssen, sowie entsprechende Werkzeuge, die eine schnelle Visualisierung und Bewertung von energiebezogenen Kenngrößen ermöglichen (siehe **Bild B1**). Dies bedeutet für das Gebäudemanagement eine Zusatz-

aufgabe, die bislang nur in einer Minderzahl von Gebäuden fachgerecht praktiziert wird, und deshalb wurde in dem Forschungsprojekt „Teilenergiekennwerte von Nichtwohngebäuden“ [5] ein anderer Weg gewählt, über den die Qualität von Gebäuden relativ einfach analysiert und energetische Schwachstellen rasch identifiziert werden können. Diese Methode ist insbesondere auch für Gebäude (Wohn- und Nichtwohngebäude) anwendbar, die keine umfangreiche Zählerinfrastruktur bzw. Monitoring-Werkzeuge aufweisen, aus denen aber bestimmte Verbrauchsdaten bekannt sind oder im Rahmen einer energetischen Analyse über Kurzzeitmessungen erfasst werden können. Das Verfahren ist demnach u. a. für Energieberater interessant, die sich den Dienstleistungssektor der systematischen energetischen Verbesserung von Nichtwohngebäuden erschließen wollen.

1 Lastganganalyse in Gebäuden, Messgrößen und Hinweise zur Leistungsmessung

Als Lastgang bezeichnet man allgemein den zeitlich (hoch) aufgelösten Verlauf der Leistungsaufnahme einer bestimmten technischen Anlage oder eines Verbrauchers in einem Gebäude. Unter der Lastganganalyse versteht man demzufolge die systematische Aufbereitung und Auswertung solcher kontinuierlich erfassten Messdaten über einen bestimmten Zeitraum. Der Begriff „Lastgang“ weist darauf hin, dass streng genommen nur Leistungsdaten (Strom, Wärme, Kälte) betrachtet werden, häufig werden unter diesem Begriff aber auch Analysen von Energieverbräuchen (über unterschiedliche Zeitspannen) subsummiert. Daten aus Lastgangmessungen von Gebäuden waren bisher eher selten verfügbar und spielten daher bei der energetischen Bewertung von Gebäuden eine eher untergeordnete Rolle. Mittlerweile bieten jedoch immer mehr Energieversorgungsunternehmen (EVU) und private Dienstleister solche Lastganganalysen an, in der Regel auf Basis vorhandener Zähler. Insbesondere bei Gebäuden mit einer schlechten Zählerstruktur können temporäre Lastgangmessungen mit mobilen Messgeräten der erste Schritt zu einer detaillierteren Verbrauchsauswertung sein. Durch den sehr wahrscheinlich steigenden Einsatz von intelligenten Zählern der EVUs am Hausanschluss und vermehrter Anbindung von Zähleinrichtungen an die Gebäudeleittechnik

Autoren

Andreas Wagner, Fachgebiet Bauphysik und technischer Ausbau (fbta), Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Michael Kleber, Fachgebiet Bauphysik und technischer Ausbau (fbta), Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Moritz Hartloff, Fachgebiet Bauphysik und technischer Ausbau (fbta), Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Michael Hörner, Dipl.-Phys., Energieberater (TU), LEED Accredited Professional, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Arbeitsbereich Energie am IWU Darmstadt.



Bild B1: Messdaten-Visualisierung mit der Software MoniSoft des KIT

von Nichtwohngebäuden werden zukünftig häufiger ausführliche Lastgangdaten vorliegen.

Die zeitliche Auflösung von Lastgangdaten liegt in der Regel mindestens bei einer Stunde, häufig bei 15 Minuten. Der jeweilige angegebene Wert für ein solches Zeitintervall stellt die mittlere Leistung während dieser Zeit dar. Diese mittlere Leistung wird entweder vom Messgerät direkt ermittelt oder am Energiezähler durch die Differenz von End- und Anfangswert des jeweiligen Zeitintervalls berechnet.

Für die Messung der elektrischen Leistung ist die Charakteristik des Stromnetzes entscheidend. In Wechselstromnetzen kann die Leistung aufgrund des Wechselstroms und der Phasenverschiebung nicht wie beim Gleichstrom einfach aus dem Produkt von Spannung mal Stromstärke berechnet werden. Je nachdem, ob Einphasen- oder Dreiphasenwechselstrom vorliegt, müssen Wirkleistung, Blindleistung und Scheinleistung jeweils unterschiedlich berechnet werden [6].

Für die Messung von Wärme- und Kälteleistungen müssen der Volumenstrom und der Temperaturunterschied zwischen Vor- und Rücklauf an einer

bestimmten Stelle eines Wärme- oder Kältekreises gemessen werden und die Wärmekapazität sowie die Dichte des Wärmeträgermediums bekannt sein. Es stehen eine Reihe unterschiedlicher Wärme- und Kältemengenzähler mit unterschiedlichen Messprinzipien zur Verfügung, deren Signale automatisch erfasst werden können.

Zeitbezogene Verbräuche der einem Gebäude zugeführten Energieträger wie Öl, Gas oder Holz sind z. T. nur mit größerem Aufwand messtechnisch zu erfassen. Zum Beispiel wird man in vielen Gebäuden heute noch Erdgaszähler vorfinden, die lediglich über ein mechanisches Zählwerk verfügen. Ein mögliches, aber aufwändiges Verfahren zur Erfassung von Lastgängen ist das automatische Abfotografieren des Zählerstandes in regelmäßigen Abständen. Alternativ können optische Lesegeräte eingesetzt werden.

Zur Bestimmung des Ölverbrauchs in hoher zeitlicher Auflösung gibt es keine Standardlösungen. Füllstandssensoren (Schwimmer oder Ultraschallmessgeräte) sind zu ungenau, um stündliche Verbrauchswerte zu generieren. Eine Möglichkeit besteht darin, den Durchfluss zwischen Förderpumpe und Brenner zu erfassen. Auch der Verbrauch

von Holzpellets oder -hackschnitzeln muss indirekt, z. B. über Wiegen, erfasst werden. Weitere Details hierzu finden sich in [6].

Sind kontinuierlich erfasste Messdaten in einer zeitlich hohen Auflösung nicht verfügbar, können trotzdem Teilenergiekennwerte erfasst werden, in dem Daten aus Kurzzeitmessungen hochgerechnet werden. Als Kurzzeitmessung werden in diesem Zusammenhang Messreihen bezeichnet, die nicht über einen vollen Monat oder ein volles Jahr vorliegen und die entsprechend auf Monats- oder Jahreswerte hochgerechnet werden müssen. So könnte z. B. im Rahmen einer Energieberatung eine Messung mit einem mobilen Messgerät mit einer Dauer von bis zu 4 Wochen durchgeführt werden, um das Lastverhalten einer Kältemaschine zu analysieren. Auch die Ablesung von vorhandenen oder nachträglich installierten Zählern über eine begrenzte Dauer oder in größeren bzw. unregelmäßigen Abständen kann Informationen über den Betrieb von Anlagen liefern. Zur Durchführung solcher Kurzzeitmessungen muss geklärt werden, wer im Gebäude für die technischen Anlagen verantwortlich ist und wer den Zugang zu diesen gewähren kann. Im Vorfeld sollte auf Basis von Schaltplänen o. ä. festgelegt werden, welche Verbraucher man an der entsprechenden Stelle erfasst. Misst man an Unterverteilungen oder an einzelnen Anlagen, sollten die Installationstermine (z. B. abends) so gewählt werden, dass Eingriffe in die Regelung der betroffenen Anlagen keine Nutzerbeeinträchtigungen verursachen.

Ist eine Gebäudeleittechnik (GLT) vorhanden, sollte man sich beim Betreiber oder der entsprechenden Fachfirma informieren, ob bereits Daten in entsprechend hoher Zeitauf Auflösung vorliegen oder in Zukunft gespeichert werden können. Wichtig ist dabei auch

eine Exportmöglichkeit der Daten, weil oft eine tiefergehende Langzeitanalyse mit den vorhandenen Auswerteroutinen der GLT-Software nicht möglich ist. Eine Lastgangmessung sollte mindestens über zwei Wochen durchgeführt werden. In jedem Fall sollten alle Wochentage und ein Wochenende (Bestimmung der Grundlast) mindestens zweimal enthalten sein. Während der Messung sollte das Gebäude möglichst gemäß seinem normalen Profil genutzt werden. Ferien bzw. Urlaubszeiten, evtl. Umbauarbeiten oder Sanierungen am Gebäude sind als Messzeiträume zu vermeiden, es sei denn man will genauer wissen, welches Teillastverhalten das Gebäude dann zeigt. Wärmerelevante Messungen sollten in der kalten Jahreszeit, kälterelevante Messungen in der warmen Jahreszeit stattfinden. Falls Aufwand und Kosten es zulassen, sollten eine Messung in der Sommerperiode und eine in der Heizperiode durchgeführt werden. So können Einflüsse der Jahreszeit und somit des Klimas auf den jeweiligen Lastgang untersucht sowie die unter-

schiedlichen Regelstrategien überprüft werden.

2 Datenauswertungen mit dem Lastgang-Tool

Im Rahmen des Projektes wurde am KIT ein EXCEL-Werkzeug programmiert, mit dem beliebige Lastdaten standardisiert ausgewertet und dar-

können dabei unterschiedliche zeitliche Auflösungen besitzen, sie sollten mindestens eine Auflösung von 2 Stunden haben. Eine 10- oder 15-Minuten-Auflösung verbessert die Ergebnisqualität für die meisten Auswertungen. Für Lastganganalysen über einen kürzeren Zeitraum von einigen Tagen kann auch eine minutengenaue Auf-

Ist der maximal mögliche Wert überschritten?
Ist der minimal mögliche Wert unterschritten?
Sind negative Werte möglich?
Ist der Wert 0 möglich oder stellt er einen Datenausfall dar?
Ändert sich ein Wert länger nicht als eigentlich möglich?
Ist der Sprungwert innerhalb eines Intervalls möglich?

Tabelle B1: Auswahlkriterien zur Datenbereinigung

gestellt werden können. Dieses Werkzeug ist zusammen mit einer Nutzeranleitung unter [6] frei verfügbar. Die Bedienung erschließt sich über die Feldbenennungen und Farbgebungen zur Unterscheidung von Eingabe- und Ergebnisfeldern. In einem ersten Schritt werden Lastgangdaten in das entsprechende Tabellenblatt kopiert bzw. eingetragen. Die Lastgangdaten

lösung verwendet werden. Je geringer die zeitliche Auflösung der Lastgangdaten ist, desto ungenauer werden die Auswertungen (z. B. Stufenbildung bei Dauerlinien), daher sind einige Auswertungen bei zu schlechter Datenqualität nicht sinnvoll. Bild B2 zeigt das Tabellenblatt „Lastgangdaten“ mit exemplarischen Zählerwerten.

Benötigte Daten		Daten aktualisieren	19.02.2013 12:22:06: Daten erfolgreich aktualisiert!		Daten löschen...	Daten löschen...	
Daten löschen...		Daten löschen...		Daten löschen...		Daten löschen...	
Hauptzähler ("Endenergie")		Untierzähler für Effizienzberechnung ("Nutzenergie")		Untierzähler 1		Untertzähler 2	
Bezeichnung: Hauptzähler Geb. 10.50		Bezeichnung:		Bezeichnung: Addition Aufzug 1+2		Bezeichnung: Aufzug 1	
Minimum: 0,00		Minimum: 0,00		Minimum: 0,00		Minimum: 0,00	
Maximum:		Maximum: 1000,00		Maximum:		Maximum:	
Wert "0" möglich: ☒		Wert "0" möglich:		Wert "0" möglich: ☒		Wert "0" möglich: ☒	
Maximale Änderung:		Maximale Änderung:		Maximale Änderung:		Maximale Änderung:	
Gültigkeit:		Gültigkeit: 10		Gültigkeit:		Gültigkeit:	
Zellen färben: ☐		Zellen färben: ☐		Zellen färben: ☐		Zellen färben: ☐	
Minimum: 0		Minimum: 0,00		Minimum: 0		Minimum: 0	
06.11.2011 00:28				08.11.2011 21:53		08.11.2011 12:39	
Maximum: 1900		Maximum:		Maximum: 28,2271165408962		Maximum: 19,0740363132715	
14.11.2011 09:13		0,00		02.12.2011 04:47		06.12.2011 20:15	
Anzahl der Werte: 3308		Anzahl der Werte: 52517		Anzahl der Werte: 51638		Anzahl der Werte: 51638	
Anzahl der Werte "0": 3040		Anzahl der Werte "0": 11918		Anzahl der Werte "0": 25006		Anzahl der Werte "0": 34262	
Anzahl der Datenlücken: 0		Anzahl der Datenlücken: 0		Anzahl der Datenlücken: 0		Anzahl der Datenlücken: 0	
Zeitpunkt	mittlere Leistung in kW	Zeitpunkt	mittlere Leistung in kW	Zeitpunkt	mittlere Leistung in kW	Zeitpunkt	mittlere Leistung in kW
06.11.2011 00:13:23	0,00			8.11.11 12:00	24	08.11.2011 12:00:0	9,122365193
06.11.2011 00:28:23	0,00			8.11.11 12:01	16	08.11.2011 12:01:0	9,03022011
06.11.2011 00:43:23	0,00			8.11.11 12:02	19	08.11.2011 12:02:0	10,64275939
06.11.2011 00:58:23	0,00			8.11.11 12:03	12	08.11.2011 12:03:0	7,371608237
06.11.2011 01:13:23	0,00			8.11.11 12:04	19	08.11.2011 12:04:0	10,04381622
06.11.2011 01:28:23	0,00			8.11.11 12:05	18	08.11.2011 12:05:0	8,431276921
06.11.2011 01:43:23	0,00			8.11.11 12:06	20	08.11.2011 12:06:0	12,4395889
06.11.2011 01:58:23	0,00			8.11.11 12:07	15	08.11.2011 12:07:0	5,759068935
06.11.2011 02:13:23	0,00			8.11.11 12:08	5	08.11.2011 12:08:0	1,935047162
06.11.2011 02:28:23	0,00			8.11.11 12:09	12	08.11.2011 12:09:0	6,680519965
06.11.2011 02:43:23	1200,00			8.11.11 12:10	11	08.11.2011 12:10:0	3,685804119
06.11.2011 02:58:23	0,00			8.11.11 12:11	17	08.11.2011 12:11:0	7,694116097
06.11.2011 03:13:23	0,00			8.11.11 12:12	13	08.11.2011 12:12:0	6,265867001
06.11.2011 03:28:24	0,00			8.11.11 12:13	12	08.11.2011 12:13:0	3,547586464
06.11.2011 03:43:24	0,00			8.11.11 12:14	11	08.11.2011 12:14:0	4,330819839
06.11.2011 03:58:24	0,00			8.11.11 12:15	18	08.11.2011 12:15:0	6,818737619
06.11.2011 04:13:24	0,00			8.11.11 12:16	12	08.11.2011 12:16:0	5,851214038
06.11.2011 04:28:24	0,00			8.11.11 12:17	13	08.11.2011 12:17:0	11,28777511
06.11.2011 04:43:24	0,00			8.11.11 12:18	7	08.11.2011 12:18:0	7,325535686
06.11.2011 04:58:24	0,00			8.11.11 12:19	4	08.11.2011 12:19:0	2,856498192
06.11.2011 05:13:24	0,00			8.11.11 12:20	15	08.11.2011 12:20:0	3,501513913
06.11.2011 05:28:24	0,00			8.11.11 12:21	8	08.11.2011 12:21:0	4,929763009
06.11.2011 05:43:24	0,00			8.11.11 12:22	22	08.11.2011 12:22:0	9,537018157

Bild B2: Tabellenblatt „Lastgangdaten“ mit exemplarischen Zählerwerten

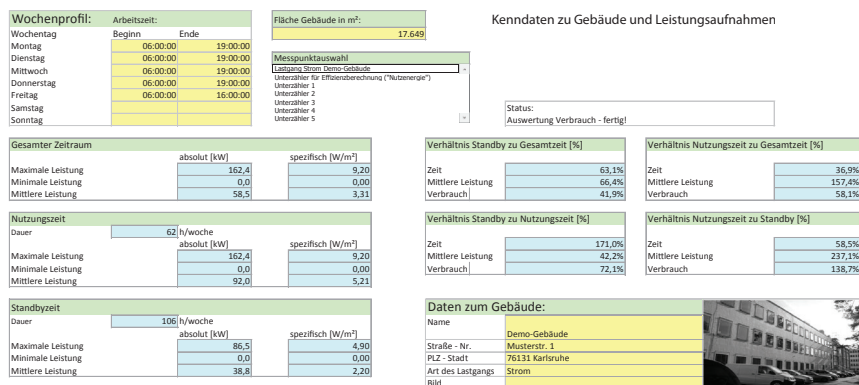


Bild B3 Tabellenblatt mit verschiedenen Kennwerten eines Gebäudes

Für verlässliche Ergebnisse müssen die erfassten Daten zunächst auf Unstimmigkeiten, offensichtliche Messfehler bzw. Ausreißer hin untersucht und bei Bedarf bereinigt werden. Hierzu bietet das Werkzeug eine Option, über die Kriterien gemäß **Tabelle B1** zur Datenbereinigung spezifiziert werden können. Mit dem bereinigten Datensatz können dann unterschiedliche Auswertungen vorgenommen werden. Dazu können zusätzlich zu den Lastgangdaten auf einem anderen Tabellenblatt die Klimagrößen Außenlufttemperatur und Globalstrahlung eingelesen werden, ebenfalls mit der Möglichkeit der Bereinigung.

Zur Datenauswertung sind eine ganze Reihe unterschiedlicher Schaubilder vorgesehen. Zunächst wird ein Übersichtsblatt mit verschiedenen Kennwerten generiert. Vom Anwender können Nutzungszeiten für die einzelnen Wochentage, Bezugsflächen und weitere Gebäudedaten eingegeben werden, woraus zusätzliche spezifische Kennwerte generiert werden. Bild B3 zeigt ein solches exemplarisches Tabellenblatt.

Zu den weiteren Darstellungen des Lastgang-Tools gehören geordnete Dauerlinien, Zeitreihen mit unterschiedlicher Auflösung (Tages-, Wochen- und Monatsprofile von Lastdaten und berechneten Wirkungsgraden), Monats- oder Jahresenergieverbräuche sowie die Auftragung von Lastdaten bzw. Wirkungsgraden über Klimagrößen. Die **Abbildungen B4 bis B6** zeigen unterschiedliche Auswertmöglichkeiten mit den dazugehörigen

rigen Auswahlmenüs. Zusätzlich ist es möglich, für Verbrauchsdaten eine Klimabereinigung durchzuführen. Dazu wird das Berechnungsprogramm „Gradtagszahlen_Deutschland.xls“ des IWU [7] verwendet, das direkt aus dem Lastgang-Tool aufgerufen wird (vgl. **Bild B6**). Über das Menu können sowohl eine geeignete Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes, die Grenztemperatur sowie die Vergleichsmethode ausgewählt werden. Zur Weiterverwendung der Daten in dem Werkzeug „Kurzzeitmessung“ [3] gibt es eine Exportfunktion, mit der die Daten in Stunden-, Tages-, Monats- oder Jahreswerte gewandelt werden können. Hinsichtlich der Interpretation und Analyse der Lastdaten finden sich im Leitfaden „Lastganganalyse“ weitere Hinweise [6].

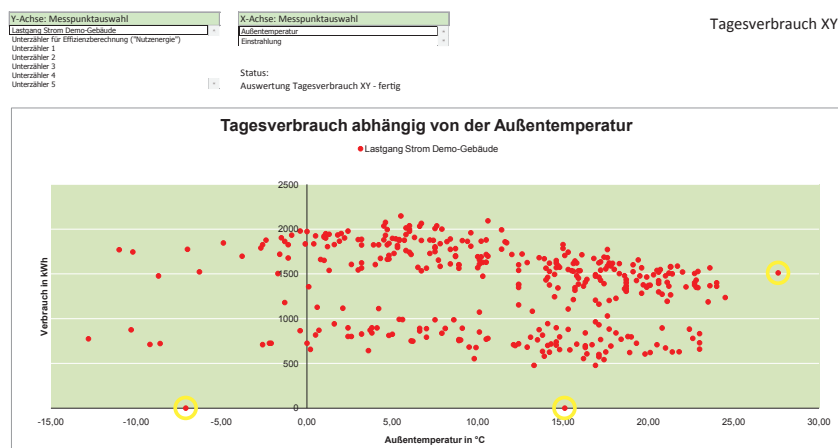


Bild B4

Tabellenblatt „Schaubild Tagesverbrauch XY“ mit aus dem Lastgang ermittelten Tagesverbrauchswerten in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur. Im gezeigten Beispiel sind zwei unterschiedliche Punktwolken in der Darstellung zu erkennen (Unterschied zwischen Arbeitstagen und Wochenenden). Mögliche Fehlwerte in der Darstellung sind gelb markiert.

Messpunkttauswahl
 Lastgang Strom Demo-Gebäude
 Unterzähler für Effizienzberechnung ("Nutzenergie")
 Unterzähler 1
 Unterzähler 2
 Unterzähler 3
 Unterzähler 4
 Unterzähler 5

Wochenauswahl
 alle
 Woche 1 2009 - 01.01.2009 bis 04.01.2009
 Woche 2 2009 - 05.01.2009 bis 11.01.2009
 Woche 3 2009 - 12.01.2009 bis 18.01.2009
 Woche 4 2009 - 19.01.2009 bis 25.01.2009
 Woche 5 2009 - 26.01.2009 bis 01.02.2009
 Woche 6 2009 - 02.02.2009 bis 08.02.2009
 Woche 7 2009 - 09.02.2009 bis 15.02.2009
 Woche 8 2009 - 16.02.2009 bis 22.02.2009
 Woche 9 2009 - 23.02.2009 bis 01.03.2009

Wochenprofil

 Status:
 Auswertung Wochenprofil - fertig!

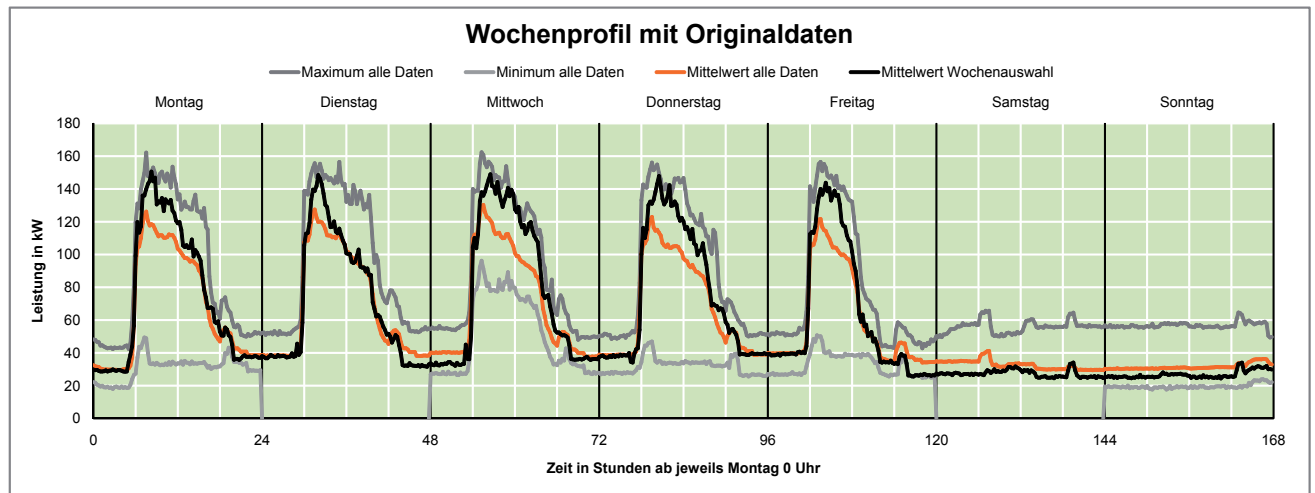


Bild B5 Tabellenblatt „Schaubild Wochenprofil“ mit eingetragenen Lastgangdaten in der zeitlichen Auflösung der Originaldaten. Über eine Auswahlliste können beliebig viele Wochen angezeigt werden. Standardmäßig werden die jeweiligen Maximal- und Minimalwerte des gewählten Lastgangs sowie der mittlere Lastgang für den gesamten Zeitraum als graue Linien angezeigt. Der mittlere Lastgang aus den ausgewählten Daten wird als schwarze Linie gezeichnet.

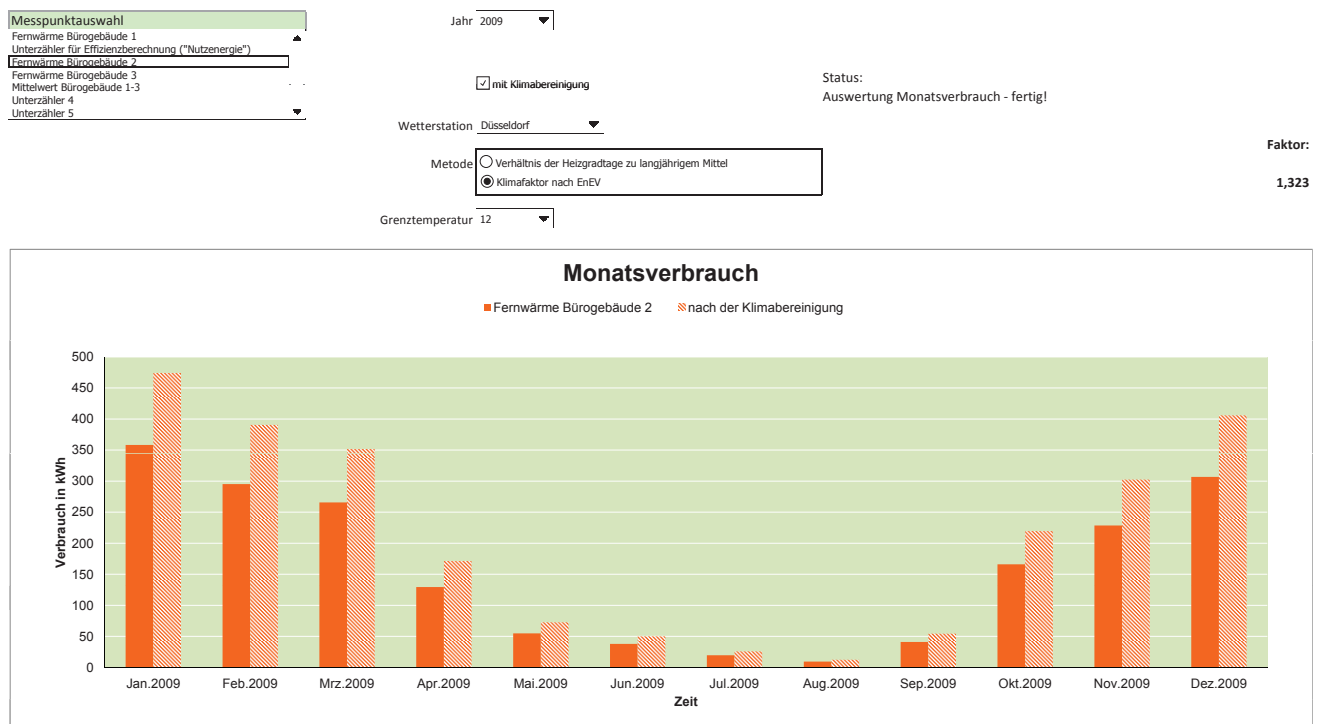


Bild B6 Tabellenblatt „Schaubild Monatsverbrauch“. Hier werden alle Monate eines individuell auswählbaren Jahres angezeigt, zu denen Verbrauchswerte gebildet werden können. Über die Schaltflächen im Auswahlménü wird die Schnittstelle zum IWU Klimabereinigungs-Tool „Gradtagszahlen_Deutschland.xls“ aktiviert.

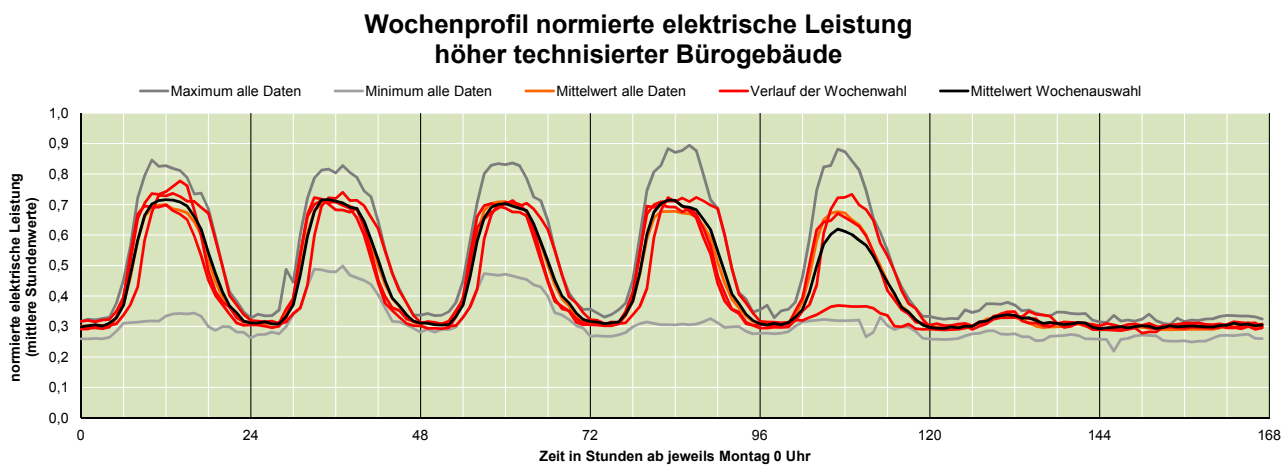
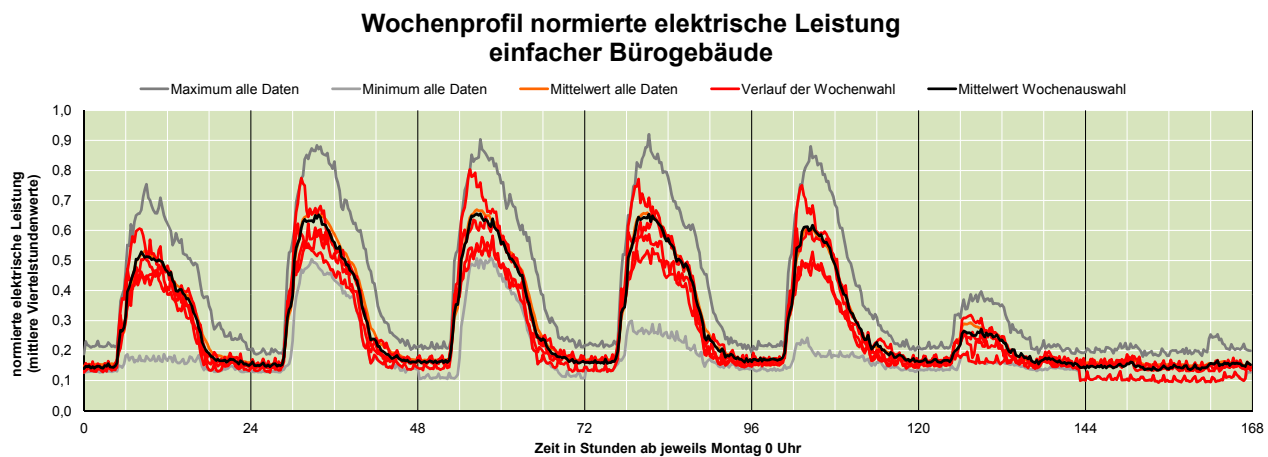


Bild B7 Wochenprofile der normierten elektrischen Leistung einfacher und höher technisierter Bürogebäude: Dargestellt sind die mittleren Profile jeweils mehrerer Gebäude von je einer Woche aus jeder Jahreszeit (rot), deren Mittelwert (schwarz) sowie Maximum und Minimum aller Wochen des Jahres (grau) und deren Mittelwert (orange)

3 Ergebnisse aus der Feldphase des Forschungsprojekts TEK

Alle im Forschungsprojekt TEK [5] entwickelten Tools, auch das Tool Lastganganalyse, wurden in der Feldphase an 75 teilweise recht komplexen Nichtwohngebäuden erprobt. Dabei waren nach Möglichkeit zu jedem Gebäude auch Lastgangmessungen der Strom-, Brennstoff- oder Fernwärme- bzw. Kälteverbräuche, jeweils gemessen am Hauptzähler des Gebäudes, zu beschaffen und für die energetische Bestandsaufnahme zu analysieren. Diese und aus anderen, vergleichbaren Projekten stammende Daten wurden ge-

sammelt, aufbereitet und ausgewertet. Dies vor dem Hintergrund, dass die Zählerausstattung von Bestandsgebäuden oft immer noch unbefriedigend ist, zumindest im Sinne ihrer Tauglichkeit für ein gezieltes Energiemanagement, und man deshalb versuchen muss, aus den oft vorhandenen Messungen für das gesamte Gebäude Rückschlüsse zu ziehen. Inzwischen liegen 140 Lastgangmessungen aus 84 Gebäuden für die verschiedenen Endenergiearten und sechs Gebäudekategorien (Büro, Handel, Hotel, Schule, Veranstaltung sowie Wissenschaft und Lehre) vor, deutlich mehr und in besserer Qualität für elektrische Energie als für Brennstoff- und Fernwärmeverbräuche.

In der Phase 3 Querschnittsanalyse im Projekt TEK sind wir unter anderem folgenden Fragen nachgegangen: Welche typischen Merkmale weisen Lastgänge verschiedener Gebäudekategorien auf, deren Muster z. B. für Abschätzungen oder Hochrechnungen bei anderen Gebäuden dieser Kategorie genutzt werden könnten? Oder: Können typische Verhältnisse vom Betriebsverbrauch während der Nutzungszeit zum „Stand-by-Verbrauch“ außerhalb der Nutzungszeiten festgestellt und für die Energieanalysen nutzbar gemacht werden?

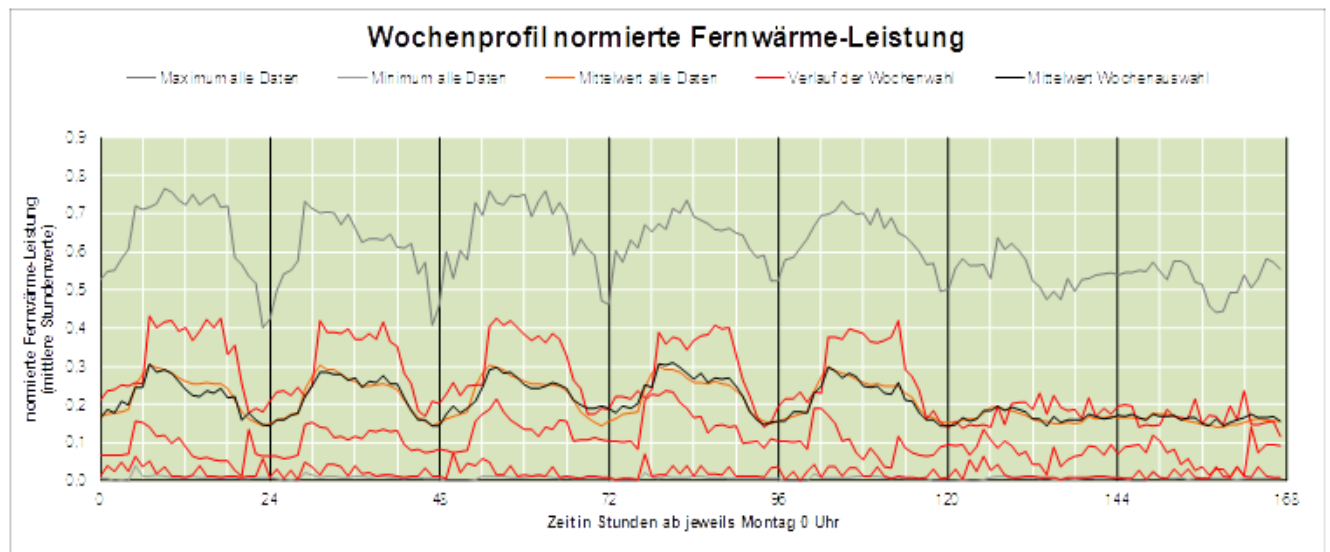


Bild B8 Wochenprofile der normierten Fernwärme-Leistung von Bürogebäuden: Dargestellt sind die mittleren Profile jeweils mehrerer Gebäude von je einer Woche aus jeder Jahreszeit (rot), deren Mittelwert (schwarz) sowie Maximum und Minimum aller Wochen des Jahres (grau) und deren Mittelwert (orange)

Zu diesem Zweck wurden die Messdaten aus den Lastgängen auf die jeweils gemessene maximale Leistung normiert. Dadurch können Unterschiede und Gemeinsamkeiten im Verlauf der Lastgänge verschiedener Gebäude und Gebäudekategorien besser vergleichbar gemacht werden.

So lassen sich aus Wochenprofilen der normierten elektrischen Leistung wie in Bild B7 sehr schnell Rückschlüsse auf den Technisierungsgrad bzw. die Betriebsweise der Anlagen ziehen. Dargestellt sind die Profile jeweils für

die 5., 18., 31. und 44. Kalenderwoche als mittlere Werte über mehrere Bürogebäude mit der gleichen Charakteristik. Ein einfach ausgestattetes Bürogebäude nimmt demnach außerhalb der normalen Nutzungszeit etwa 15 % der maximalen elektrischen Leistung in Anspruch, ein höher technisiertes eher 30 % und mehr. Für die Energiebilanz kann das wichtige Hinweise auf die Modellierung der Betriebszeiten von Anlagen geben.

Deutlich weniger ausgeprägt ist die Modulation des Tag-Nacht-Rhythmus

beim Brennstoff- und Fernwärmeverbrauch (**Bild B8**). Trotz Nacht- und Wochenendaussenkung gehen die gemessenen Leistungen in der Heizzeit weniger stark zurück, wie man an der Maximumkurve sieht. Anders als beim Strom gibt es jedoch eine ausgeprägte jahreszeitliche Abhängigkeit der Wochenprofile. Die Kurve der Sommerwoche sowie die Kurve für das Minimum über alle Daten liegen nahe bei der Nulllinie.

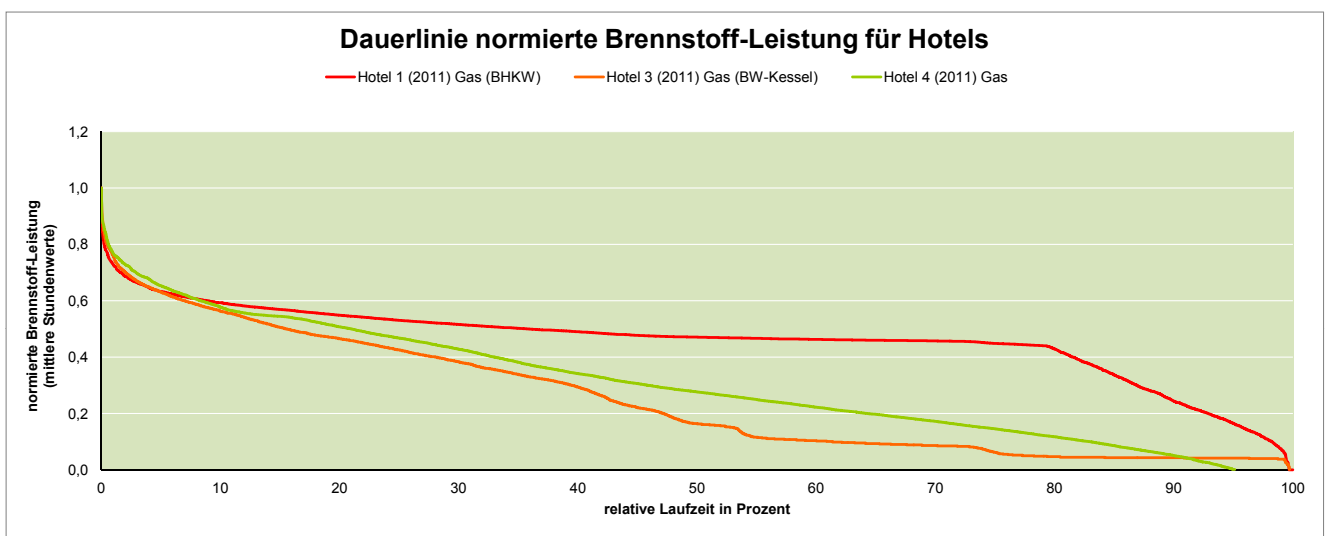


Bild B9 Jahresdauerlinie der normierten Brennstoff-Leistung für Hotels, die mit unterschiedlichen Wärmeerzeugungstechnologien ausgestattet sind: BHKW, Brennwärtsessel, Niedertemperaturkessel.

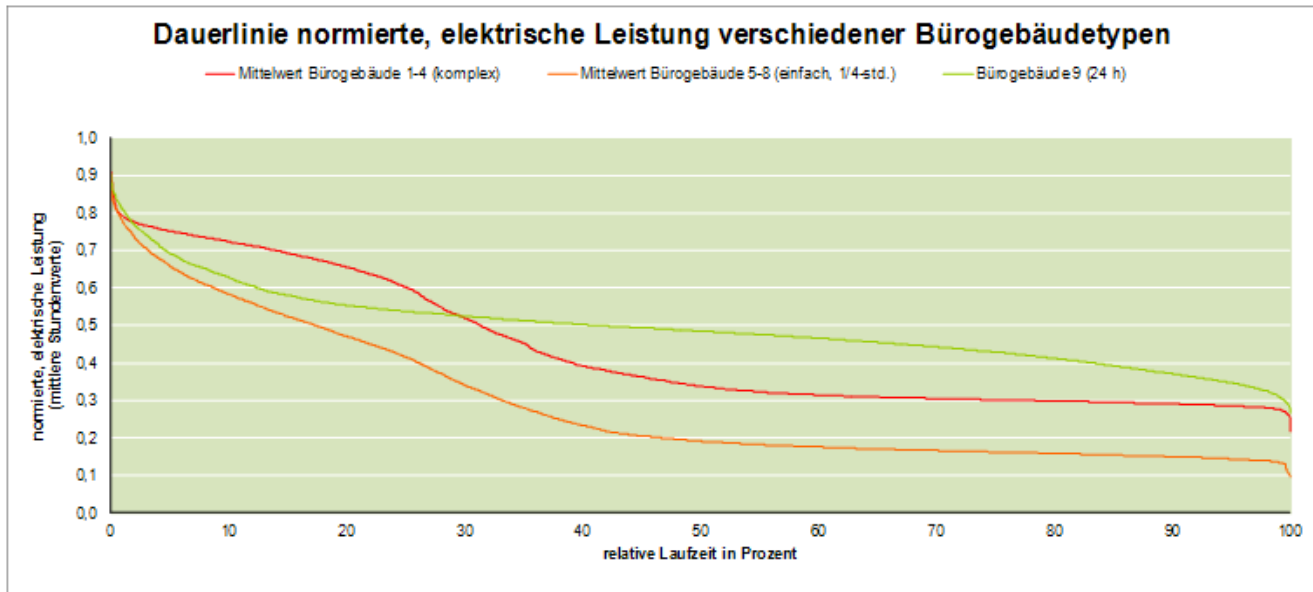


Bild B10 Jahresdauerlinie der normierten elektrischen Leistung für Bürogebäude mit unterschiedlicher technischer Ausstattung und Nutzung: Hochtechnisiert, niedrig technisiert, 24-Stunden-Nutzung.

Auch geordnete Jahresdauerlinien können wichtige Hinweise auf die technische Ausstattung bzw. Betriebsweise geben. Die Dauerlinien des Brennstoffverbrauchs für drei Hotels der 4 und 5 Sterne-Klasse in Bild B9 zeigen charakteristische Verläufe etwa durch erhöhten Brennstoffbedarf für ein BHKW (Hotel 1) oder die Effekte der Brennwertnutzung in den Übergangsjahreszeiten in Hotel 3.

In Bild B10 sind geordnete Jahresdauerlinien der normierten elektrischen Leistung für verschiedene Klassen von

Bürogebäuden dargestellt. Erkennbar ist der Einfluss des Technisierungsgrads auf die geordnete Jahresdauerlinie. Bei höher technisierten Bürogebäuden 1 – 4 ist der Verlauf bauchiger und bei der einfach ausgestatteten Bürogebäuden 5 - 8 eher flach. Aber auch ungewöhnliche Nutzungszeiten hinterlassen eindeutige Spuren, z. B. bei 24-Stunden-Nutzung. Im Unterschied zum Technisierungsgrad ist der Einfluss der Nutzungszeit an einem langen Plateau hoher Leistungsan- spruchnahme zu erkennen.

Charakteristika von Lastgängen der normierten elektrischen Leistung für unterschiedliche Gebäudekategorien zeigt Bild B11, jeweils als Mittelwerte über mehrere, gleichartig genutzte Gebäude. Im Unterschied zu Bürogebäuden erkennt man Handelsgebäude an den längeren Nutzungszeiten und niedrigen Standby-Verbräuchen. Schulen dagegen sind im Mittel deutlich niedriger technisiert als Bürogebäude und haben auch geringere Nutzungszeiten.

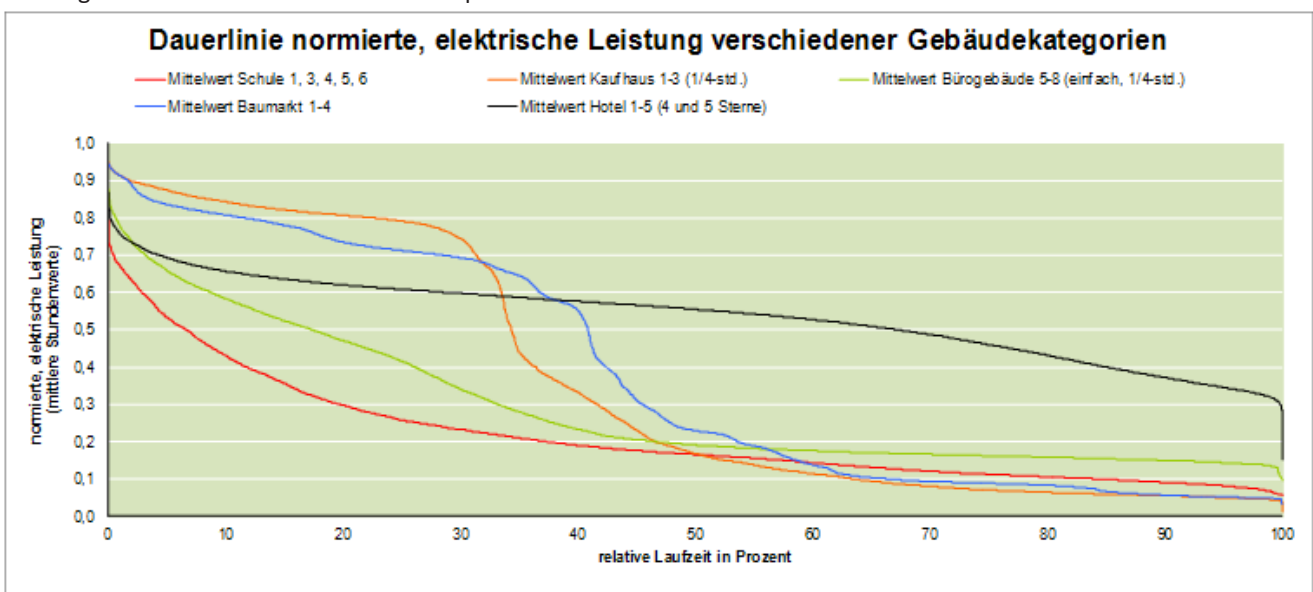


Bild B11 Geordnete Jahresdauerlinien der normierten elektrischen Leistung für unterschiedliche Gebäudekategorien als Mittelwerte über mehrere, gleichartig genutzte Gebäude

4 Fazit

Bisher bieten vielfach spezialisierte Firmen und einige EVU an, Lastgänge zu messen, um Aufschlüsse über den Energieverbrauch eines Gebäudes zu erhalten. Oft geschieht dies zusätzlich zur Analyse der Lastspitzen und Blindleistung, Zielgruppe sind vornehmlich große Unternehmen (Energieverbrauch pro Jahr > 100.000 kWh, Anschlussleistung > 50 kW). Mithilfe der hier vorgestellten Methodik und des Werkzeugs soll die Lastganganalyse Bestandteil der Energieberatung auch bei kleineren Gebäuden werden und dabei helfen, aus diesen Daten einfach Teilenergiekennwerte zu generieren bzw. das tatsächliche Betriebsverhalten von Anlagen zu erkennen. Voraussetzung sind vorhandene Messdaten von gebäudeinternen Zählern oder aus eigens für die Lastganganalyse temporär installierter Messtechnik. Im Gegensatz zu einer professionellen

Monitoring-Software mit automatisierten Routinen für Dateneinlesen, Plausibilitätsprüfung, Visualisierung, Analyse und Berichterstellung ist das Lastgang-Tool auf einen eher händischen Umgang mit den Daten ausgerichtet, wofür keine programmspezifischen Kenntnisse und somit nur eine minimale Einarbeitungszeit erforderlich sind. Trotzdem sind alle wichtigen Funktionen von der Bereinigung falscher Messdaten über die automatische grafische Darstellung in verschiedenen Auftragungen bis hin zum Datenexport für die Weiterverarbeitung vorhanden. Damit steht ein praktikables Werkzeug für die Analyse von Leistungsdaten aus Gebäuden im Rahmen einer zeitlich begrenzten Energieberatung zur Verfügung.

Quellen

- [1] Programmbeschreibung EnerCalc, <http://www.enob.info/?id=enercalc>
- [2] Handbuch TEK-Tool und Beschreibung der Methodik, <http://www.iwu.de/index.php?id=286>
- [3] Leitfaden zur Hochrechnung von Kurzzeitmessungen des Fraunhofer ISE, <http://www.iwu.de/index.php?id=286>
- [4] BMWi-Forschungsprogramm „Energie optimiertes Bauen – Gebäudeevaluierung und energetische Betriebsoptimierung“, <http://www.enob.info/de/betriebsoptimierung/>
- [5] Projektbeschreibung TEK, <http://www.enob.info/de/software-und-tools/projekt/details/tek-teilenergiekennwerte-fuer-nichtwohngebäude-im-bestand/>
- [6] Leitfaden Lastgangmessung des fbta, <http://www.iwu.de/index.php?id=286>
- [7] Programm zur Ermittlung von Gradtagszahlen deutscher Städte, www.iwu.de/datei/Gradtagszahlen_Deutschland.xls

C Methode zur Hochrechnung von Teilenergiekennwerten auf der Basis von Kurzzeitmessungen

1 Kurzfassung

Für die fünf Energiedienstleistungen Heizwärme, Warmwasser, Beleuchtung, Luftförderung und Kälte wurden im Rahmen des Forschungsprojektes Teilenergiekennwerte von Nichtwohngebäuden (TEK) Verfahren zur Hochrechnung von Teilenergiekennwerten auf der Basis von Kurzzeitmessungen entwickelt, validiert und als EXCEL-Arbeitshilfe implementiert. Die entwickelten Methoden auf Basis linearer Regression und eines Saison-Index-Verfahrens erreichen je nach Kennwert Genauigkeiten zwischen $\pm 10\%$ und $\pm 50\%$.

Die Methodik und ein EXCEL-Werkzeug zur Hochrechnung von Kurzzeitmessungen auf den Jahresenergieverbrauch einer Anlage werden in diesem Abschnitt vorgestellt.

2 Zielstellung

Idealerweise werden zur Ermittlung objektspezifischer Teilenergiekennwerte hochaufgelöste Messungen der jeweiligen Größe durchgeführt, aus denen sich zum einen der Anteil des jeweiligen Kennwertes am Gesamtverbrauch ableiten lässt und die zum anderen als Grundlage für die Analyse der Abhängigkeiten dieser Größen von Randbedingungen wie Wetter oder Gebäudenutzung dienen können. In der Regel ist dies jedoch im Gebäudebestand sowohl aus technischen und zeitlichen als auch aus wirtschaftlichen Gründen nicht möglich. Hier setzt das im Folgenden beschriebene Verfahren und Werkzeug zur Prognose von Teilenergiekennwerten an: Mit welcher Methode können die jeweiligen Teilenergiekennwerte für Heizwärme, Warmwasser, Beleuchtung, Luftförderung und Kälte auf Basis

von Kurzzeitmessungen prognostiziert werden, welche Genauigkeiten können mit diesen Methoden erreicht werden, welche Voraussetzungen müssen gegeben sein und wie sind gegebenenfalls Kurzzeitmessungen durchzuführen?

3 Methode

Prognoseverfahren wie die Saison-Index-Methode und Lineare Regression Prognoseverfahren spielen in vielen wissenschaftlichen Disziplinen eine Rolle (z. B. Meteorologie, Medizin, Wirtschaftswissenschaften, Wahlforschung) und werden daher in verschiedenen Forschungsbereichen, den jeweiligen Anforderungen entsprechend, weiterentwickelt. Entsprechend gibt es bereits umfangreiche Arbeiten zum Thema. So gibt es z. B. aus dem Bereich der Wirtschaftswissenschaften ein Verfahren, dem der Name »Saison – Index Methode« entliehen ist [4]. Bei vielen quantitativen Prognoseverfahren werden mathematisch-statistische Verfahren verwendet.

Der Aufwand für Kurzzeitmessungen soll gering gehalten werden und sich in einen typischen Projektablauf einer Gebäudeanalyse einordnen können. Daher werden hier Verfahren für die Prognose von Jahreswerten aus Messungen mit einem Zeitraum von zwei bis vier Wochen entwickelt.

Aus der Statistik bzw. Mess- und Testtheorie sind einige grundlegend wichtige Anforderungen an Prognosen bekannt, die so auch für Prognosen hinsichtlich des Energieverbrauchs auf Basis von Kurzzeitmessungen gültig sind. Dies sind die Nachvollziehbarkeit des Verfahrens, die Gültigkeit des Verfahrens bzw. die Angabe von Randbedingungen, innerhalb der die Gültig-

keit gegeben ist, sowie die Zuverlässigkeit des Verfahrens. Hinzu kommt als weiteres Kriterium die Einfachheit des Verfahrens in der praktischen Anwendung. Es werden hier zwei Verfahren zur Prognose von Energiekennwerten aufgrund von Kurzzeitmessungen beschrieben, die je nach gemessenem Teilenergiekennwert einsetzbar sind:

- **Multiple lineare Regression:** Bei der multiplen linearen Regression erfolgt eine Prognose des Energiekennwerts auf Basis von relativ vielen, zeitlich hochaufgelösten Messungen des Teilenergiekennwertes und typischen Klimarandbedingungen. Dazu gehören insbesondere die Außenlufttemperatur und – soweit verfügbar – die Einstrahlung. Auf Basis eines postulierten linearen Zusammenhangs zwischen diesen Größen und dem Teilenergiekennwert wird der Verbrauch prognostiziert.

Durch die Regression soll die Differenz $r = y - \hat{y}$ zwischen den gemessenen Ausgangsgrößen y und den berechneten Ausgangsgrößen $\hat{y}$, die in diesem Zusammenhang Residuum r genannt wird, minimiert werden. Häufig wird für die Berechnung der Werte die Methode der kleinsten Fehlerquadrate verwendet. Falls nicht ausdrücklich anders spezifiziert, ist hier mit linearen Regressionsmodellen immer diese Methode gemeint. D. h. die Regressionsmodelle

$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n$ minimieren die Summe der Quadrate der Residuen:

$$\text{Min}_\beta \left(S = \sum_{i=1}^m r_i^2 = \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2 \right)$$

Dabei sind $\hat{y}_i$ die berechneten Aus-

gangs- bzw. Regressionsgrößen, x_1 bis x_n Eingangsgrößen, β_1 bis β_n die Regressionskoeffizienten bzw. -parameter und y_1 bis y_m die Messwerte der Ausgangsgröße.

• Saison-Index-Methode:

Dieses Verfahren ist geeignet für Teilenergiekennwerte, die eine starke saisonale Abhängigkeit zeigen wie der Heizenergiebedarf, der Kältebedarf oder in bestimmten Fällen die Beleuchtungsenergie und der energetische Aufwand für die Luftförderung. Das Verfahren entspricht einer Dreisatz-Berechnung.

Für jeden Monat wird das Verhältnis aus monatlichen Messwerten – dies können entweder Verbrauchsmesswerte an einem vergleichbaren Gebäude oder meteorologische Größen wie Gradtage oder Einstrahlungssummen sein – und dem entsprechenden Jahreswert gebildet:

$$SI_{\text{Monat,Geb,Jahr}} = \frac{\bar{P}_{\text{Monat,Geb,Jahr}}}{\bar{P}_{\text{Geb,Jahr}}}$$

Dieses Verhältnis wird als Saison-Index des Teilenergiekennwertes im Monat _{Monat} des Gebäudes _{Geb} im Jahr _{Jahr} bezeichnet.

Zur Bildung der Referenzwerte ist es wichtig, dass langjährige Mittelwerte über viele gleichartige Gebäude genutzt werden können, um für jeden Monat den (mittleren) Saisonindex über viele Gebäude n_{Geb} dieses Gebäudetyps zu bilden:

$$\bar{SI}_{\text{Monat,Gebtyp}} = \frac{1}{n_{\text{Geb}}} \sum_{\text{Geb} \in \text{Gebtyp, Jahr}} SI_{\text{Monat,Geb,Jahr}}$$

Damit die Mittelwertbildung sinnvoll ist, muss eine ausreichende Anzahl von Messwerten vorliegen und deren Verteilung grob einer Normalverteilung ähneln. Unter Umständen ist es deshalb sinnvoll bzw. notwendig Ausreißer zu entfernen und mit statistischen Methoden wie der Clusteranalyse die Gebäudetypen festzulegen. Aus dieser Definition ist erkennbar,

dass die Summe dieser Saison-Indizes ungefähr eins ergeben muss. Aufgrund der unterschiedlichen Länge der einzelnen Monate ergeben sich kleine Differenzen zu eins. Durch den Bezug der Saison-Indizes auf die Leistung spielen die Betrachtungszeiträume keine so dominante Rolle wie bei einem Bezug auf Energiewerte. Bei den Leistungen ist z. B. der Umgang mit Schaltjahren schon in der Definition der Saison-Indices korrekt beschrieben und muss nicht extra geregelt werden.

Aus dem (mittleren) Saison-Index SI_{Monat} kann die mittlere Jahresleistung und damit der Jahreswert eines in einer Kurzzeitmessung ermittelten Teilenergiekennwertes P_{Monat} mit folgendem Ansatz ermittelt werden:

$$E_{\text{Geb,Jahr}} = \bar{P}_{\text{Geb,Jahr}} \cdot t_{\text{Jahr}} = \frac{\bar{P}_{\text{Monat}}}{\bar{SI}_{\text{Monat}}} \cdot t_{\text{Jahr}} \text{ für } \bar{SI}_{\text{Monat}} > 0$$

3.2 Messung

Die Kurzzeitmessungen sollten einen Zeitraum von mindestens vierzehn Tagen umfassen, bei Teilenergiekennwerten, die mit dem Saison-Index-Verfahren ermittelt werden einen bzw. drei Monate. Bei den Messungen kann hinsichtlich der Messwerterfassung von zwei verschiedenen Situationen ausgegangen werden:

- Messwerte werden automatisch erfasst, z. B. mit Datenloggern oder mit Hilfe der Gebäudeautomation
- Messwerte werden durch manuelles Ablesen von (Energie-) Zählern erfasst.

Bei automatisch erhobenen Messwerten ist in der Regel eine deutlich höhere zeitliche Auflösung realisierbar, d. h. es sollte in Stundenintervallen oder kürzer gemessen werden. Damit können dann leicht Tagessummen- oder Tagesmittelwerte berechnet werden. Die zweite Situation ist z. B. denkbar, wenn Gas-, Öl-, Strom-, Wärme- und

Kältemengen-, Wasser- oder Betriebsstundenzähler vorhanden sind, die nicht regelmäßig (min. jährlich) erfasst werden. Es ist dann notwendig, dass diese Zähler für zwei bis vier Wochen täglich zur gleichen Zeit manuell erfasst werden. Dabei sollte die Erfassungsuhrzeit möglichst immer gleich sein und sie sollte notiert werden, damit gegebenenfalls Korrekturmöglichkeiten hinsichtlich des Messintervalls bestehen. Damit die Prognoseverfahren uneingeschränkt benutzt werden können, sollte das Messintervall einen Tag umfassen. Wesentliche Größen bei der Prognose von Teilenergiekennwerten sind die klimatischen Randbedingungen Lufttemperatur und ggf. Einstrahlung. Falls diese nicht vor

Ort gemessen

werden oder

hilfsweise aus

der Zuluft -Temperatur einer Lüftungsanlage abgeleitet werden können, sind diese Daten bei Betreibern von in der Nähe gelegenen meteorologischen Messstationen erhältlich.

Autoren

Dipl.-Ing. Sebastian Herkel,

Studium des Maschinenbaus an der Universität Karlsruhe. Wissenschaftliche Mitarbeit am Fraunhofer ISE mit Schwerpunkt Energieeffizienz im Gebäude. Leiter der Abteilung Solares Bauen

Michael Hörner, Dipl.-Phys., Energieberater (TU), LEED Accredited Professional, Jahrgang 1957, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Arbeitsbereich Energie am IWU Darmstadt.

Dirk Jacob, Studium der Physik in Würzburg, danach langjährige Mitarbeit im Ingenieurbüro Stahl und Weiss. Anschließend Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer ISE und Promotion am KIT.

Damit die Prognoseverfahren sinnvoll angewendet werden können, muss das Gebäude zur Messzeit normal bzw. repräsentativ genutzt werden (Belegung, Steuerung). Falls die Energiemessungen für Teilbereiche eines Gebäudes (oder Gebäudekomplexes oder einer Gebäudezone) durchgeführt werden, können die Prognoseergebnisse auf das Gesamtgebäude mit einem Dreisatz-Ansatz entsprechend dem Flächen- oder Volumenanteil hochgerechnet werden. Dies setzt voraus, dass der gemessene Teilbereich repräsentativ für den Gesamtbereich ist.

3.3 Prognosemethoden für die Teilenergiekennwerte Heizwärme, Warmwasser, Kälte, Beleuchtung und Luftförderung

Welche Prognosemethode für welchen Teilenergiekennwert am besten geeignet ist ergibt sich aus der Art der Abhängigkeit des Kennwertes von äußeren Randbedingungen. Gibt es dominante Einflussfaktoren wie die Außenlufttemperatur oder folgt der Energieverbrauch einem sehr regelmäßigen wöchentlichen Muster ist eine lineare Regression die Methode

der Wahl. Wird der Kennwert neben den äußeren Randbedingungen stark von einer variablen Nutzung oder von baulichen Voraussetzungen wie der Gebäudegeometrie bestimmt, bietet sich das Saison-Index-Verfahren an. In **Tabelle C1** sind für die verschiedenen Teilenergiekennwerte jeweils die entwickelten linearen Regressionsmodelle und Saison-Index-Verfahren beschrieben und erläutert.

4 Validierung

Die entwickelten Verfahren wurden anhand von Messwerten hinsichtlich ihrer Plausibilität überprüft. Als Datengrundlage wurden Messdaten für Teilenergiekennwerte aus Gebäuden verwendet, bei denen mindestens ein vollständiger Datensatz mit einer zeitlichen Auflösung von ≥ 1 Messwert/h für den Zeitraum eines Jahres vorlag. Hierbei wurde auf Daten zurückgegriffen, die im Rahmen von öffentlich geförderten Demonstrationsvorhaben der Förderlinie Energie Optimiertes Bauen EnOB oder des Vorhabens ModQS erhoben wurden. Zu einzelnen Teilenergiekennwerten, wie dem Energieaufwand für Luftförderung bei Anlagen mit variablem Volumenstrom; gab es keine ausreichenden Messdaten, hier wurde durch Variationsrechnungen auf Grundlage detaillierter

Gebäudesimulation die Genauigkeit der jeweiligen Ansätze zur Prognose ermittelt.

Beispielhaft wird die Genauigkeit der Methoden an einem 1985 gebauten Bürogebäude in Essen, einem 2001 gebauten Bürogebäude in Kassel und anhand der Simulation eines Büroraumes dargestellt. Die wichtigsten Kenndaten sind in **Tabelle C2** dargestellt.

Die Genauigkeit der Prognoseverfahren ist für die verschiedenen Teilenergiekennwerte unterschiedlich, da u. a. auch die Streuung der (Jahres-) Messwerte dieser Teilenergiekennwerte sehr unterschiedlich sein kann. Im Rahmen des Gesamtverfahrens erscheint eine Genauigkeit der Prognoseverfahren von $\pm 10\%$ wünschenswert. Diese Genauigkeit ist z. B. vergleichbar mit der Genauigkeit, die bei speziellen Berechnungen mit der EN ISO 13790 (vereinfachtes Verfahren zur Berechnung des dynamischen Verhaltens von Gebäuden) erreicht werden. Bei Abweichungen von mehr als -50% , bzw. $+100\%$ bieten Prognoseverfahren kaum noch einen Nutzen. Damit könnte nur in Situationen, in denen es sonst keine anderen Möglichkeiten mehr gibt, erste Einschätzungen von Teilenergiekennwerten gewonnen werden. Als Zielwert für die Genauigkeit der Prognoseverfahren gehen wir

Standort / Bezeichnung	Essen		Kassel		Variation Simulation 15 Standorte in Dtl.
Baujahr	1985		2001		-
Energiebezugsfläche	20.389 m ²		4.035 m ²		-
Nutzung	Büro		Büro/Seminarräume		Büro
	Messung Verbrauch [kWh/m ²]	Methode	Messung Verbrauch [kWh/m ²]	Methode	Methode
Heizwärme	60	lin. Reg.	-		
Warmwasser	0,5	lin. Reg.	-		
Kälte	-		-		Saison-Index
Luftförderung	5,7		-		Saison-Index
Beleuchtung	-		3,3	Saison-Index	

Tabelle C2: Kenndaten der zur Entwicklung und Validierung der Methoden verwendeten Gebäude

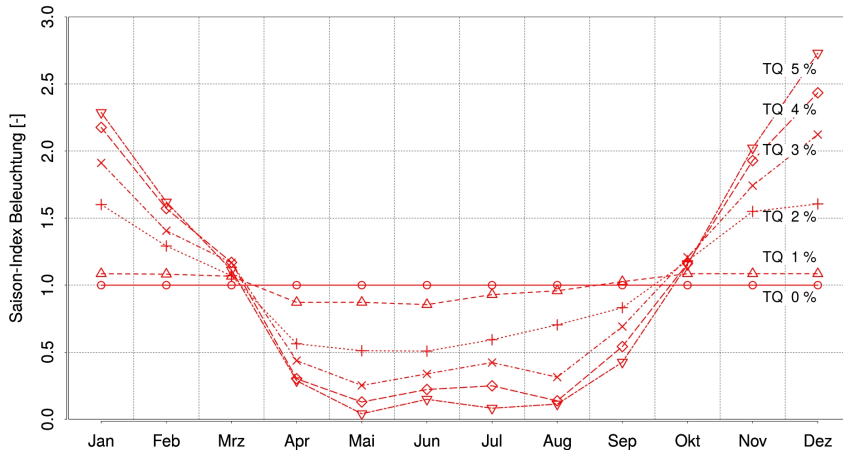


Bild C1: Saison-Indizes Beleuchtung für verschiedene Tageslichtquotienten. Die dargestellten Indizes gelten für die Diffuse Globalstrahlung des Testreferenzjahres 12, einer Betriebszeit von 8⁰⁰-18⁰⁰ und einer Nennbeleuchtungsstärke von 300 Lux.

daher von besser als $\pm 20\%$ aus. Bei Vergleichen mit realen Gebäuden bzw. Fehlerrechnungen ergeben sich deutlich geringere Genauigkeiten, im Folgenden beispielhaft für die Teilenergiekennwerte Beleuchtung, Kälte und Warmwasser dargestellt.

4.1 Beleuchtung

Dadurch, dass die Beleuchtung notwendig ist, wenn das natürliche Tageslichtangebot nicht ausreicht, bestehen praktisch keine linearen Zusammenhänge mit Tagesdurchschnittswerten der Einstrahlung (sowohl Global- als auch Diffusstrahlung). Selbst zwischen Stundenwerten der Global- (horizontal)-Strahlung und der tatsächlich in das Gebäude eindringenden Strahlung besteht nur ein schwacher Zusammenhang. Aus diesen Gründen lässt sich die Beleuchtungsenergie mit linearen Regressionen nicht erfolgreich prognostizieren.

Im Folgenden wird anhand von Messdaten der Beleuchtungsstärke und des Beleuchtungsenergiebedarfs von vier Bereichen des Gebäudes in Kassel die Genauigkeit des Saison-Indexverfahrens dargestellt. Erste Erfahrungen mit dem vorgestellten Verfahren zeigen, dass Genauigkeiten von $\pm 50\%$ erreicht werden. **Bild C2** zeigt den

Jahresverlauf des relativen Energiebedarfs für Beleuchtung des Gebäudes in Kassel. Die Standardabweichung beträgt für den Kellerraum $\pm 39\%$, für das 1. OG $\pm 314\%$ bzw. $\pm 74\%$. Lässt man die deutlich ausreißenden Werte für den Monat Juli und August 2002 weg, erreicht man eine Genauigkeit von $\pm 52\%$. Die Auswertung der Messdaten hat gezeigt, dass die Beleuchtungsenergie sehr starken Schwankungen unterworfen ist. Einerseits ist in vielen Fällen ein deutlicher bis sehr deutlicher saisonaler Einfluss erkennbar, andererseits scheinen auch sehr starke zufällige Schwankungen vorzukommen.

In Büroräumen wird die Beleuchtung häufig manuell geschaltet und hängt stark vom individuellen Nutzerverhalten bzw. deren Bedürfnissen und Tätigkeiten ab. Deshalb ist die Beleuchtungsenergie neben den objektiv bewertbaren und messbaren Größen wie Nutzungszeit, Tageslichtangebot und installierter Leistung starken statistischen Schwankungen unterworfen. Diese sind insbesondere in Räumen mit gutem Tageslichtangebot ausgeprägt, deshalb ist insbesondere für diese Gebäudeklasse eine Prognose schwierig.

Bei 3 von 6 Gebäuden, von denen

Messdaten analysiert werden konnten, waren große Änderungen der Beleuchtungszeitpläne erkennbar (meist für einige Wochen oder Monate). Dadurch unterliegt auch der Jahresverbrauch für die Beleuchtungsenergie großen Schwankungen. Bei den untersuchten Gebäuden war das bis zu $+100\%$ bzw. -50% . Das Prognoseverfahren für die Beleuchtungsenergie erweist sich damit als noch nicht ausreichend genau. Aus den oben ausgeführten Gründen ist es grundsätzlich schwierig für die Beleuchtungsenergie ein Prognoseverfahren auf Basis von Kurzzeitmessungen zu entwickeln.

4.2 Kälte

Die Saison-Indizes für dieses Prognoseverfahren wurden mit Hilfe von dynamischen Simulationsrechnungen für verschiedene Standorte und meteorologische Testreferenzjahre ermittelt. Wichtige Simulationsrandbedingungen wurden in Anlehnung an Randbedingungen für typische Bürogebäude gewählt [5]. Variiert wurden die Art des Sonnenschutzes, die Steuerung des Sonnenschutzes, die internen Lasten und die Schwere des Gebäudes. Es wurden je Variante jeweils 7 Gebäudeorientierungen betrachtet, so dass sich 42 Simulationsvarianten ergaben. Die auf dieser Basis sich ergebenden Saison-Indizes sind in **Bild C3** dargestellt. Auswertungen der simulierten und gemessenen Datensätze zeigen, dass aus angepassten Messperioden die Jahresenergie mit der Saison-Index-Methode relativ gut prognostiziert werden kann. Die mittlere Leistung der simulierten bzw. gemessenen Antriebsenergie der Kälteerzeugung in den Zeiträumen (alle Angaben sind einschließlich gemeint): Feb – Jul, Mrz – Jun, Aug – Dez, Aug – Jan weisen eine durchschnittliche Leistung für die Antriebsenergie Kälteerzeugung auf, die dem tatsächlichen Jahresdurchschnittswert mit $\pm 20\%$

bis 30 % entspricht (siehe **Bild C4**). Die Ausreißer entstehen insbesondere in dem Fall, bei dem die Kühllasten durch interne Lasten hervorgerufen werden. Die saisonale Ausprägung der Kühllast ist umso geringer, desto stärker diese von den internen Lasten bestimmt ist. Die Häufigkeitsverteilung des Verhältnisses der Prognose des Kältebedarfs mit Saison-Index-Verfahren $Q_{c,pred}$ zum simulierten Jahreswert $Q_{c,sim}$ ist in **Bild C5** dargestellt. Dargestellt ist die Auswertung von Simulationsrechnungen mit 42 unterschiedlichen Varianten und den beiden dreimonatigen Zeiträumen März bis Juni sowie August bis November. Die Abweichung vom Mittelwert beträgt 3 % mit einer Standardabweichung von ± 26 %.

4.3 Warmwasser

Der Warmwasserbedarf in Nichtwohngebäuden ist in der Regel sehr gleichmäßig im Laufe des Jahres und hängt insbesondere von den Zeiten und dem Umfang der anwesenden Personen ab, eine Ausnahme stellen Hotels oder Restaurants mit Küchen dar. Zur Ermittlung und Quantifizierung der Genauigkeit der angewandten Verfahren mit linearer Regression wurden jeweils Messwerte von 14 aufeinanderfolgenden Tagen mit unterschiedlichen Starttagen aus den Jahreswerten eines

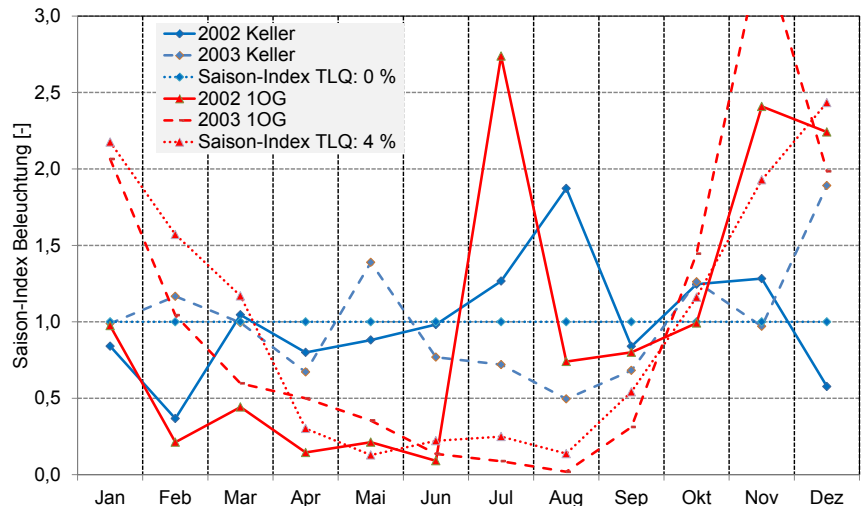


Bild C2: Messwerte der monatlichen Beleuchtungsenergie im Verhältnis zum Jahresmittelwert der Monatsverbräuche des Gebäudes in Kassel für die Jahre 2002 und 2003. Dargestellt sind die Werte für das Kellergeschoss und das 1.Obergeschoss sowie als Vergleich die monatlichen Saison-Indizes für die Tageslichtquotienten von 0 % und 4 % für die in Bild C1 angegebenen Randbedingungen.

Bürogebäudes in Essen extrahiert und eine Prognose für den Warmwasserbedarf durchgeführt. Damit konnten für den Warmwasserbedarf 331 Datensätze für die Prognose verwendet werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Mittelwert der Prognosen erwartungsgemäß bei einer linearen Regression sehr gut übereinstimmt (**Bild C6**). Die Streuung der Prognosen ist mit ± 35 % relativ hoch, d.h. die Prognosen sind recht ungenau. Eine detaillierte Analyse der Messzeitreihen zeigt, dass diese insbesondere durch einen ungewöhnlich niedrigen Warmwasserverbrauch im

Januar verursacht wird. Auch die relativ große Häufigkeit von Prognosen, die weniger als 80 % des Messwertes vorhersagen unterstreicht dies. Bei der Durchführung der Messungen oder bei Nutzung von Daten aus Gebäudeautomationssystemen sollte sichergestellt werden, dass der Zeitraum repräsentativ ist und ungewöhnliche Nutzungsänderungen ausgeschlossen werden.

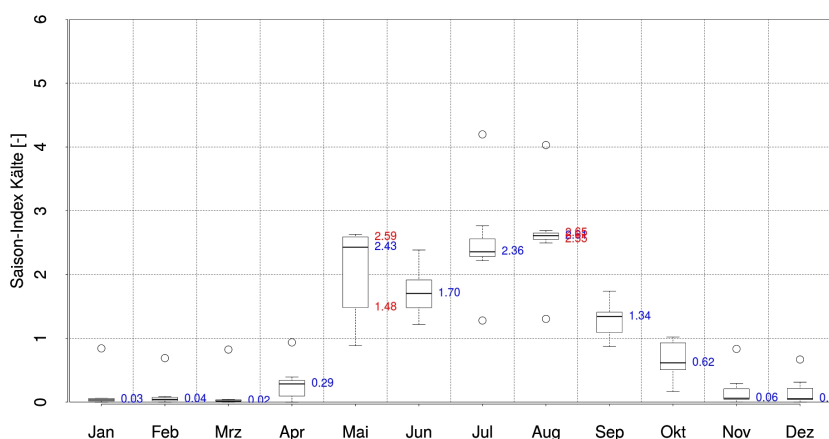


Bild C3: Saison-Indizes für die Antriebsenergie Kälte, abgeleitet aus 42 Simulationen und einer Messreihe an einem Gebäude in Essen; Die Box-plots zeigen den Median $\pm$ Quantile. Als Kreise sind Ausreißer dargestellt.

Heizen		Lineare Regression	Saison-Index- Methode	Erläuterung
Heizen	$\hat{P}_H$	Regression der mittleren Heizleistung [kW]	$Q_{H,Jahr} = \frac{Q_{H,Monat,Ref}}{S_{H,Monat}} \cdot t_{Jahr}$	Der Heizwärmeverbrauch korreliert eng mit den klimatischen Randbedingungen, in erster Linie aufgrund der Transmissionswärmeverluste und der Lüftungswärmeverluste
	$\bar{\vartheta}_e$	Tagesmittelwerte der Außentemperatur [°C]	mit	
	I_{Glob}	Tagesmittelwerte der Globalstrahlung [W/m²]	$Q_{H,Monat,Ref} = Q_{H,Monat} \cdot \frac{G_{Monat,Ref}}{Monat}$	mit der Außentemperatur und zudem mit der für die passive Solarenergienutzung zur Verfügung stehenden solaren Einstrahlung. Die Korrelation ist umso höher, je größer der spezifische Wärmebedarf ist. Bei hochwärmedämmten Gebäuden wird die Korrelation geringer. Als Verfahren zur Prognose des Bedarfs bietet sich daher die lineare Regression an. Kann die Globalstrahlung auch gemessen werden, erhöht sich die Prognosegenauigkeit und auch die Heizgrenztemperatur kann durch eine Regression aus der Kurzzeitmessung bestimmt werden. Eine Bereinigung mit langjährigen Mittelwerten des Klimas ist möglich und notwendig.
	β_0	Konstantes Glied der Regression [kW] (entspricht Heizleistung bei 0 °C und 0 W/m² Globalstrahlung)	witterungsbereinigter Teilenergiekennwert	
	β_1	Regressionskoeffizient d. Außentemperatur [kW/°C]	Heizenergie in [kWh/mon]	
	β_2	Regressionskoeffizient d. Globalstrahlung [kW/(W/m²)]	gemessener Teilenergiekennwert Heizenergie in [kWh/mon]	
Warmwasser		Verfahren für Verwaltungsgebäude und Schulen	Verfahren für spezielle Nutzungen	Erläuterung
Warmwasser	$V_{w,Jahr}$	$V_{w,Jahr} = \bar{V}_{w,Mess} \cdot t_{Jahr}$	$\bar{V}_{w,Mess} = \frac{\bar{V}_{w,Jahr}}{\bar{Y}_{Messung}}$	Der Warmwasserverbrauch wird im Wesentlichen durch den gezapften Volumenstrom, die Frischwassertemperatur und die Zapftemperatur bestimmt. Der Volumenstrom kann in der Regel durch Messung bestimmt werden. Dabei ist wichtig, dass die Zapfprofile sich wiederholen und zwischen Tagen mit unterschiedlicher Nutzung differenziert wird, z. B. bei Bürogebäuden zwischen Werktagen und Wochenendtagen bzw. Feiertagen. Die Temperaturen werden entweder messtechnisch erfasst oder können aus Normen bestimmt werden. In Fällen von Gebäudenutzungen, die starken saisonalen Schwankungen wie z. B. das Hotel- und Gaststätten-gewerbe in Urlaubsregionen oder von der Auslastung abhängigen Nutzungen wie Krankenhäusern sollten die Messwerte mit einem Saisonindex bereinigt werden, der dies berücksichtigt und normiert.
	mit:			
	$V_{w,Jahr}$	Warmwasser Jahresmenge [l]	Diese Annahme erscheint gerechtfertigt, wenn das Verhältnis von Wasserverbrauch und Bezugsgröße im Messzeitraum einigermaßen konstant ist. Der Jahresdurchschnitt des Wasserverbrauchs ist:	
	$\bar{V}_{w,Mess}$	Tagesdurchschnittsverbrauch im Messzeitraum [l/d]	$\bar{V}_{w,Jahr} = \bar{V}_{w,Mess} \cdot \frac{t_{Jahr}}{t_{Messung}}$	
	t_{Jahr}	Zeitdauer Jahr in Tagen (365 Tage)	Y: typische Nutzungskenngrößen, wie z.B. Anzahl Übernachtungen pro Tag in einem Hotel oder produzierte Einheit in der Industrie.	
	$Q_{w,b}$	$Q_{w,b} = \rho \cdot c \cdot V_{w,Jahr} \cdot (\vartheta_{w,m} - \vartheta_k)$		
	$Q_{w,b}$	Nutzenergie Warmwassererwärmung [kWh/a]		
	ρ	mittlere Wasserdichte ca. 1,0 kg/l		
	c	Wärmekapazität Wasser 1,16 · 10³ kWh/kg/K		
	$\vartheta_{w,m} - \vartheta_k$	mittlere Warm- / Kaltwasser Zapftemperatur		
Kälte		Lineare Regression	Modifizierte Saison-Index- Methode	Erläuterung
Kälte	$\hat{P}_c$	$\hat{P}_c = \beta_0 + \beta_1 \cdot \bar{\vartheta}_e + \beta_2 \cdot I_{Glob}$	$\hat{Q}_{c,Jahr} = \bar{P}_{c,Messung} \cdot t_{Jahr}$	Der Kältebedarf hängt in ähnlicher Weise von den internen Lasten und den klimatischen Randbedingungen wie Außentemperatur und Einstrahlung ab wie der Heizwärmebedarf. Der Beitrag der einzelnen Größen ist jedoch sehr unterschiedlich. Grundsätzlich nimmt der Beitrag der globalen Einstrahlung deutlich zu, ebenso der konstante Beitrag der internen Lasten. Aufgrund der geringen Temperaturunterschiede zwischen Raumtemperatur und Außentemperatur ist die Genauigkeit des Verfahrens geringer. Zudem korreliert die Einstrahlung auf eine horizontale Fläche im Sommer nicht so stark mit der vertikalen Einstrahlung auf die Fassade. Das Verfahren der linearen Regression kann deshalb nur unter Berücksichtigung der Einstrahlung und automatischer Erkennung der Kühlgrenztemperatur angewandt werden. Wird der Kälteverbrauch durch zeitlich konstant anfallende technische Kälte dominiert, ist ein modifiziertes Saison-Index-Verfahren anzuwenden.
	mit:		mit:	
	$\hat{P}_c$	Regression der mittleren Antriebsleistung für die Kühlung [kW]	$\hat{Q}_{c,Jahr}$	Prognose Jahresenergieverbrauch Antrieb
	$\bar{\vartheta}_e$	Außentemperatur (Tagesdurchschnitt) [°C]	Kälteerzeugung [kWh]	
	I_{Glob}	Global (horizontal) Strahlung (Tagesdurchschnitt) [W/m²]	t_{Jahr}	Zeitdauer Jahr (8760 h)
	β_0	Konstantes Glied der Regression [kW] (entspricht Leistung bei $\bar{\vartheta}_e = 0$ °C, $I_{Glob} = 0$ W/m²)	$\bar{P}_{c,Messung}$	Tagesdurchschnittsleistung Kälte im Messzeitraum
	β_1	Regressionskoeffizient d. Außentemperatur [kW/°C]	mit	
	β_2	Regressionskoeffizient d. Globalstrahlung [kW/(W/m²)]	$\bar{P}_{c,Messung} = \frac{\hat{Q}_{c,Messung}}{t_{Messung}}$	

Luft-förderung	Konstanter Volumenstrom	Variabler, klimainduzierter Volumenstrom	Erläuterung
	$Q_{V,aux,jahr} = \bar{Q}_{V,aux,d,Mess} \cdot \frac{365d}{Jahr}$	$Q_{V,aux,jahr} = \bar{P}_{V,aux,Mess} \cdot t_{Jahr}$	Bei Lüftungsanlagen mit konstanten Volumenströmen und regelmäßigen Betriebszeiten kann der Energiebedarf einfach durch eine Messung der Stromaufnahme im Betrieb und durch Aufnahme der Betriebszeiten prognostiziert werden. Bei Anlagen mit variablen Volumenstrom (VVS) hängt die Prognose davon ab, ob der Volumenstrom vor allem klimainduziert ist oder durch die gemessene Luftqualität z.B. CO ₂ -Sensoren geregelt wird. Die Situation ist damit ähnlich wie bei der Prognose des Kältebedarfs, ein Saison-Index-Verfahren mit längerem Messzeitraum von mehreren Monaten wird notwendig
	mit:	mit:	
	$Q_{V,aux,jahr}$	$Q_{V,aux,jahr}$	Jahresenergieverbrauch für die Luftförderung [kWh]
	$\bar{Q}_{V,aux,d,Mess}$	t_{Jahr}	Zeitdauer Jahr (8760 h)
	Luftförderungsenergieverbrauch in der mittlerer täglicher	$\bar{P}_{V,aux,Mess}$	Tagesdurchschnittsleistung Luftförderung im Messzeitraum
	Luftförderungsenergieverbrauch in der	$\bar{P}_{V,aux,Mess} = \frac{Q_{V,aux,Mess}}{t_{Mess}}$	
	Messung [kWh/d] definiert als:	$Q_{V,aux,Mess}$	Luftförderungsenergieverbrauch im Messzeitraum [kWh]
	$\bar{Q}_{V,aux,d_1}$:	t_{Mess}	Zeitdauer Messung in Stunden [h]
	Tageswert (Tag i)		
	Luftförderungsenergieverbrauch [kWh/d]		
	Anzahl der Messungen, z.B. bei 14 Tageswerten		
	n = 14		
Beleuch-tung	Saison-Index-Methode	Erläuterung	
	$Q_{I,jahr} = \frac{Q_{I,Monat,Ref}}{\bar{S}_{I,Monat}} \quad (\text{für } \bar{S}_{I,Monat} > 0)$	Der Energiebedarf für Beleuchtung ist von vier Größen abhängig: Dem Tageslichtangebot im Freien, der baulichen Situation, dem Anforderungsprofil und der daraus resultierenden installierten Leistung und dem individuellen Nutzerverhalten bei einer manuellen Schaltung der Beleuchtung und des Sonnen- bzw. Blendschutzes. Veränderliche Größen sind das Tageslichtangebot und das Nutzerverhalten. Der Ansatz für eine Prognose ist daher das Verhältnis zwischen dem theoretischen monatlichen Beleuchtungsbedarf in den Referenzdaten und dem theoretischen monatlichen Beleuchtungsbedarf beruhend auf Messdaten. Da in der Regel nur der diffuse Anteil der Einstrahlung auf eine horizontale Ebene relevant ist für die vertikale Einstrahlung auf der Fassade wird diese verwendet. Mit der Mindestanforderung an die Beleuchtung kann so ein Saison-Index abhängig vom Nutzungszeitraum entwickelt werden. Es erfolgt dabei eine Unterscheidung zwischen manueller und automatischer Schaltung, um den Einfluss des Nutzers berücksichtigen zu können.	
	mit		
	$Q_{I,jahr}$	Prognose des Jahres-Beleuchtungsenergieverbrauchs [kWh/a]	
	$\bar{S}_{I,Monat}$:	Saison-Index Beleuchtung des Messmonats aus Referenzwertdaten abgeleitet [-]	
	$Q_{I,Monat,Ref}$	witterungsbereinigter Teilenergiekennwert Beleuchtung in [kWh/mon] definiert als	
	$Q_{I,Monat,Ref} = \frac{E_{AL,Monat,Ref}}{\bar{E}_{AL,Monat}}$		
	$Q_{I,Monat}$	gemessener Teilenergiekennwert Beleuchtung [kWh/mon]	
	$E_{AL,Monat,Ref}$	theoretischer monatliche Beleuchtungsbedarf in den Referenzdaten [lux h/mon]	
	$\bar{E}_{AL,Monat}$	theoretischer monatliche Beleuchtungsbedarf in den Messdaten [lux h/mon]	

Tabelle C1: Verfahren zur Prognose für die Teilenergiekennwerte Heizen, Warmwasser, Kälte Beleuchtung und Luftförderung. Es werden jeweils die wesentlichen Kenngrößen und Zusammenhänge angegeben

5 Anwendung

5.1 TEK Prognose-Tool

Zur Durchführung einer Prognose wird als Werkzeug ein Excel-basiertes Tool bereitgestellt, das im Wesentlichen aus drei Hauptblättern besteht: Dem Hauptmenü, der Maske zur Erfassung der Messwerte und der Ergebnisdarstellung. Es kann bei der Ergebnisdarstellung je nach verfügbarem Messdatensatz und der Dauer der jeweiligen Messperiode zwischen den Verfahren zur linearen Regression und den Saison-Index-Verfahren gewählt werden.

5.2 Analysebeispiele

Im Rahmen des Projektes Teilenergiekennwerte von Nichtwohngebäuden wurde das entwickelte Verfahren an weiteren Gebäuden erprobt. Im Zuge von Gebäudeanalysen wurden für diese Gebäude die Hochrechnungsverfahren angewandt und mit Langzeitmessungen verglichen. In **Tabelle C3** sind die wichtigsten Charakteristika der Gebäude zusammengefasst. Sie gibt einen Überblick über den Vergleich Messung / Hochrechnung Prognosetool für die jeweiligen Gebäude:

In der Regel konnte eine relativ gute Prognosegenauigkeit erreicht werden bei den weniger vom Nutzereinfluss abhängigen Teilenergiekennwerten Heizung und Luftförderung. Die relativ geringe Genauigkeit der Prognose Energiebedarf Warmwasser wird nachvollziehbar, wenn man die Varianz des Wasserverbrauchs des Gebäudes MfW bedingt durch sowohl die Anwesenheit (und Belegungsdichte) als auch das individuelle Nutzerverhalten näher analysiert (vgl. **Bild C8**). Diese Varianz wirkt sich natürlich unmittelbar auf die Prognose aus. In einem solchen Fall muss möglicherweise auf das Verfahren für spezielle Nutzungen zurückgegriffen werden.

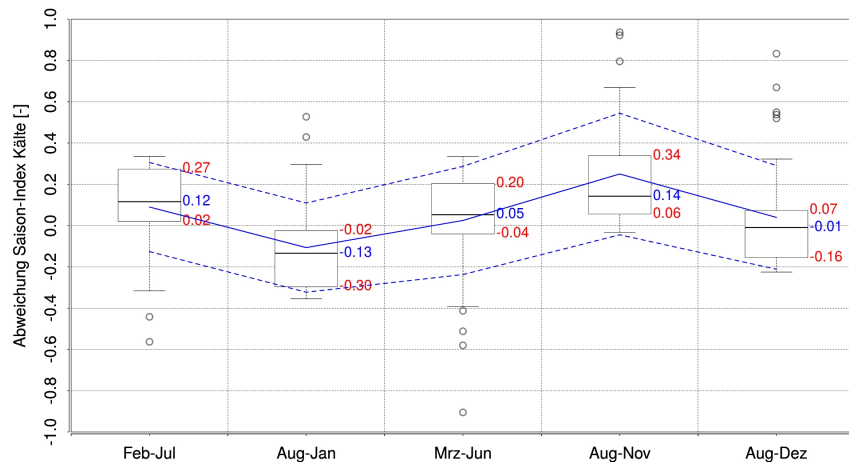


Bild C4: Boxplot der Mittelwerte der Saison-Indizes für die Antriebsenergie Kälte für unterschiedliche Messzeiträume. Die Saison-Indizes sind abgeleitet aus 42 Simulationen und einer Messreihe. Der Median sowie die oberen und unteren Quantile sind angegeben. Blau mit durchgezogener und gestrichelten Linien sind der Mittelwert $\pm$ Standardabweichung.

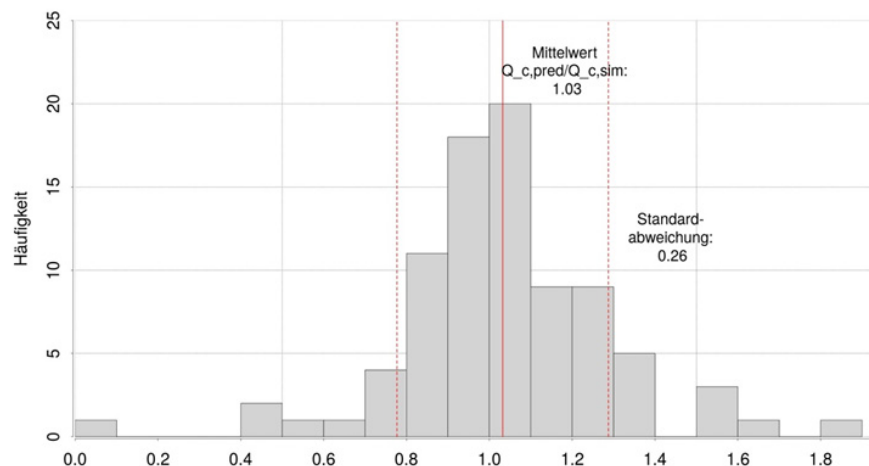


Bild C5: Häufigkeitsverteilung des Verhältnisses der Prognose des Kältebedarfs mit Saison-Index-Verfahren $Q_{c,pred}$ zum simulierten Jahreswert $Q_{c,sim}$.

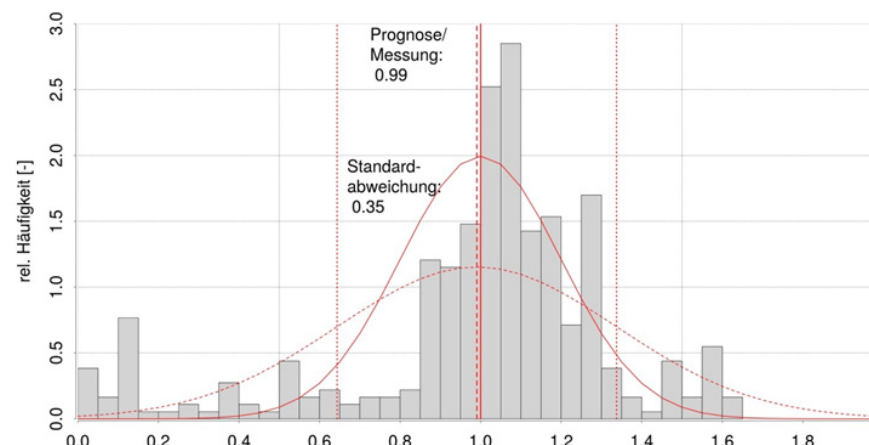


Bild C6: Relative Häufigkeitsverteilung der Prognose des Wärmebedarfs für die Warmwasserbereitung in einem Bürogebäude mit dem einfachen Verfahren für Verwaltungsgebäude. Dargestellt ist die Auswertung von Messdaten (ein Jahr Tagesdurchschnittswerte) für alle 14-tägigen Perioden in dem ausgewählten Jahr (d.h. 331 Starttage). Die Genauigkeit beträgt $\pm 35\%$. Die durchgezogene rote Linie stellt eine Normalverteilung mit einer Standardabweichung von $\pm 20\%$ dar.

6 Weitere Analysen von Kurzzeitmessungen

Über die Prognoseverfahren hinaus wurden in der Feldphase des TEK-Projekts auch andere Kurzzeitmessungen durchgeführt. Sie dienten dazu, Hilfestellungen bei der vereinfachten Abbildung von technischen Anlagen in Bestandsgebäuden abzuleiten.

6.1 Messung von Ventilatorleistungen

Im Algorithmus des TEK-Tools für den elektrischen Energiebedarf der Luftförderung wird die Nennleistung laut Typenschild des Ventilators eingesetzt. Oft werden Anlagen in der Praxis aber mit Sicherheitszuschlägen ausgelegt. So bestand eine Messaufgabe darin, die auf dem Typenschild angegebene Nennleistung der Ventilatoren von RL-Anlagen mit der tatsächlich gemessenen Wirkleistung zu vergleichen und Korrekturfaktoren abzuleiten. Insgesamt wurden im TEK-Projekt und zwei anderen Projekten 424 Vergleichsmessungen durchgeführt, davon 289 an Ventilatoren mit einer Nennleistung ≤ 5 kW.

Es zeigt sich, dass im Mittel die gemessene Leistung etwa 80 % der auf dem Typenschild angegebenen Nennleistung beträgt (**Bild C9**).

Abweichungen im Einzelfall können aber deutlich größer sein. Im Mittel über viele Gebäude in einem Portfolio ist die Korrektur von vereinfachten Berechnungen mit dem abgeleiteten Faktor aber sicher nützlich. Einschränkend muss noch gesagt werden, dass die Messungen vorwiegend in älteren Bestandsanlagen mit ein oder mehrstufigen Ventilatorantrieben vorgenommen wurden. Es wurden nur wenige moderne, stufenlos regelbare Ventilatoren gemessen; deren Charakteristik kann sich deutlich von der älterer An-

Gebäudekennung	EADS	SIC	MfW	Aula	KG2
Standort	Ottobrunn	Freiburg	Düsseldorf	Freiburg	Freiburg
Baujahr	1976	2003	1953/1961	1959	1970
(Teil-) sanierung	1996		1985	1996	
EBF	7.641 m ²	13.830 m ²	30.570 m ²	m ²	4.035 m ²
Nutzung	Büro /				
physikalische					
Labore	Büro	Büro	Hörsaal	Büro/	
Seminarräume					
Teilenergiekennwert	Heizwärme	Luft-förderung	Warm-wasser	Luft-förderung	Beleuch-tung
Messung Verbrauch					
[kWh/m ² /a]	99	1,8	3,0	51	23
Berechnung Prognose-tool					
[kWh/m ² /a]	95	1,2	2,51/2,02	46	26
Abweichung	-5 %	-35 %	17 %/33 %	-10 %	13 %

Tabelle C3: Kenndaten der verwendeten Gebäude und Vergleich Messung / Berechnung Prognose-Tool

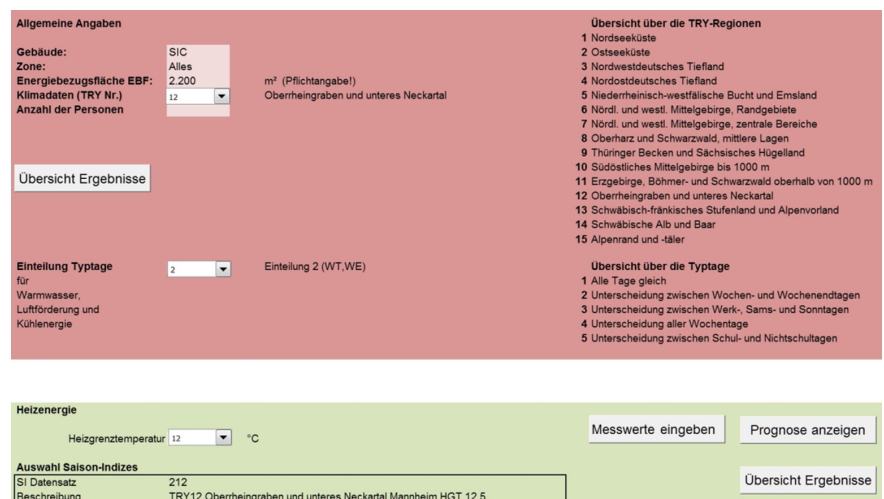


Bild C7 Ansicht der Eingabemaske des TEK Prognosewerkzeuges. Die Auswahl verschiedener vorkonfigurierter Wetterdatensätze ist möglich. Die Ergebnisse der Prognosen werden als Zahlenwerte ausgegeben.

lagen unterscheiden. Außerdem ist die dargestellte Auswertung auf die am häufigsten vorkommenden Ventilatorgrößen beschränkt.

6.2 Messungen zum Energieverbrauch von Aufzügen

In der TEK-Methodik umfasst der Bilanzkreis auch den elektrischen Energiebedarf nutzerspezifischer Anlagen, wie z. B. Aufzüge. Der Berechnungsansatz im TEK-Tool ist derzeit sehr einfach: Sind Aufzüge im Gebäude vorhanden, wird ein elektrischer Bedarf von 2 kWh/m²NGFa angenommen. In drei Gebäuden konnten Messungen an Aufzügen über jeweils zwei Wo-

chen vorgenommen werden, um den Ansatz zu überprüfen. Alternativ wurden einfache Rechenverfahren für den Energiebedarf von Aufzügen nach SIA 380/4:2006 [6] und VDI 4707 [7] zur Abschätzung erprobt. Dazu wurden die Messergebnisse auf ein Jahr hochgerechnet und mit den Berechnungen verglichen. In **Bild C9** sind die relativen Abweichungen der Berechnungsergebnisse zum Ergebnis der Hochrechnung, die als Referenz auf 100 % gesetzt wurde, dargestellt.

Bild C10 zeigt deutlich, dass der derzeitige Algorithmus des TEK-Tools zu stark vereinfacht und zu großen Abweichungen führt. Vergleichsweise gute Ergebnisse erzielt der Algorithmus der SIA 380/4, der in frühen Planungsphasen eingesetzt werden kann, wenn noch wenig über das Gebäude bekannt ist. Darin werden die Zonenstruktur und wenige Gebäudedaten genutzt, um die Anzahl der Fahrten pro Jahr und die mittlere Förderhöhe abzuschätzen, die die kritischen Parameter in der Berechnung sind.

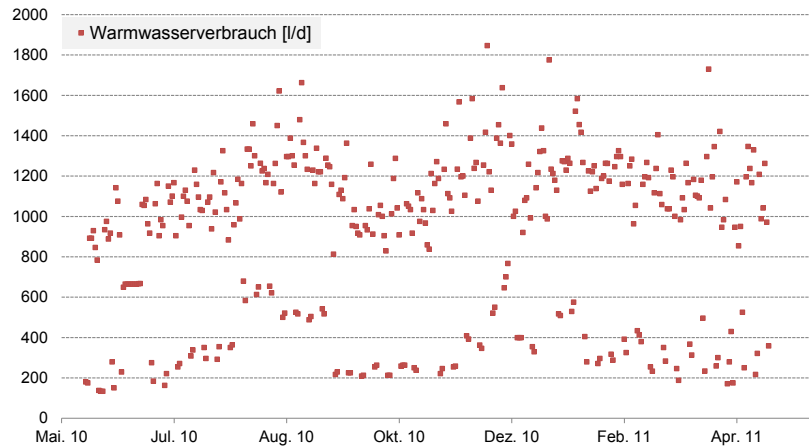


Bild C8 Mittlerer täglicher Warmwasserverbrauch des Gebäudes in Düsseldorf. Durch die nutzungsbedingte starke Varianz des Verbrauchs werden Prognosen für den Jahresverbrauch ungenau.

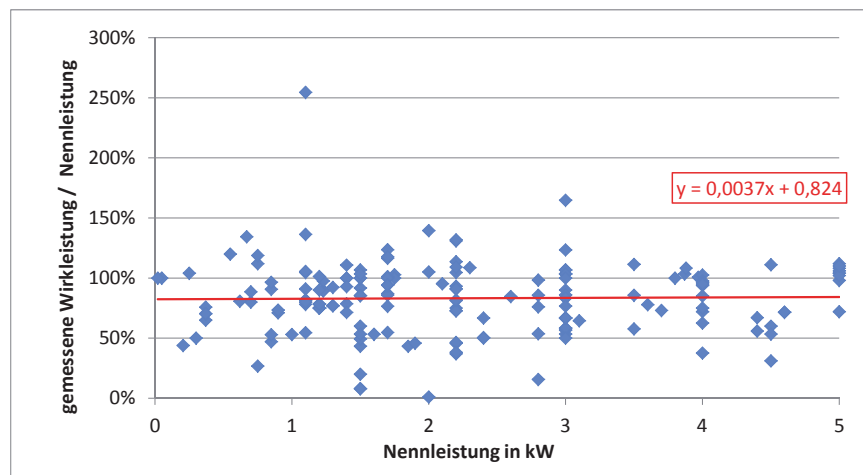


Bild C9 Verhältnis gemessener Wirkleistung zu Nennleistung für einstufige Anlagen bzw. maximale Nennleistung ≤ 5 kW

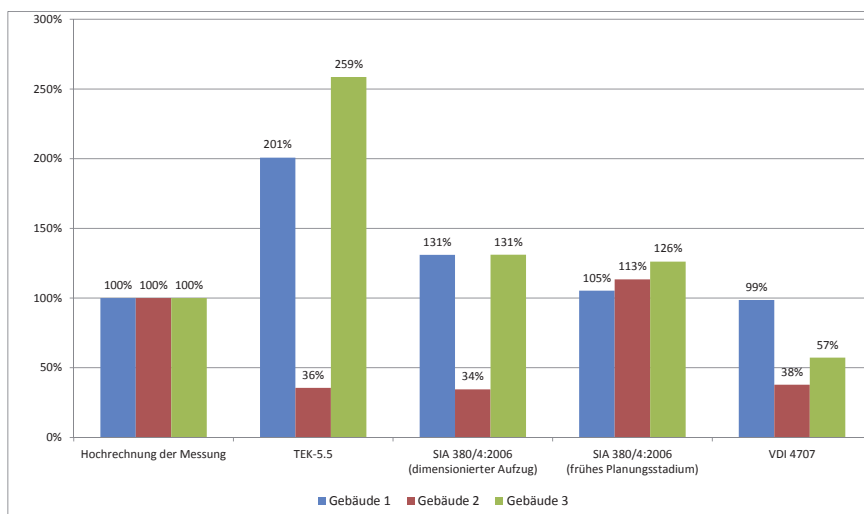


Bild C10 Relative Abweichung der Berechnungsergebnisse für den Energiebedarf von Aufzügen in Gebäuden von den Ergebnissen der auf ein Jahr hochgerechneten zweiwöchigen Messung des elektrischen Energieverbrauchs

Literatur

- [1] David, R., de Boer, J., Erhorn, H., Reiß, J., Rouvel, L., Schiller, H., Weiß, N., Wenning, M. (2006) Heizen, Kühlen, Belüften & Beleuchten: Bilanzierungsgrundlagen nach DIN V 18599. Stuttgart Fraunhofer IRB Verlag ISBN-10: 3-8167-7024-X
- [2] DIN V 18599 »Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung«. Berlin, Beuth Verlag GmbH
- [3] Hennings, D. (2000) LEE: Leitfaden Elektrische Energie im Hochbau. Darmstadt Institut Wohnen und Umwelt IWU
- [4] Hüttner, Manfred (1986) Prognoseverfahren und ihre Anwendung. Berlin New York de Gruyter
- [5] Knissel, J. (2003) Zur Klimabereinigung bei der aktiven Kühlung. Darmstadt Institut Wohnen und Umwelt IWU
- [6] Nipkov, Jörg (2005) Elektrizitätsverbrauch und Einspar-Potenziale bei Aufzügen. Zürich. Schweizerische Agentur für Energieeffizienz SAFE
- [7] VDI 4707-1:2009-3 Aufzüge – Energieeffizienz. Düsseldorf. Verein Deutscher Ingenieure e.V.

