

# BEWERTUNGSMETHODE FÜR ENERGIEEFFIZIENZMASSNAHMEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG UNSICHERER EINFLUSSGRÖSSEN

Klemens SCHLÖGL, BSc (\*)<sup>1,2</sup>, DI Matthias SCHLÖGL (\*)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>e7 Energie Markt Analyse GmbH, Walcherstraße 11/43, 1020 Wien, T: +43 1907 80 26;  
klemens.schloegl@e-sieben.at, <http://www.e-sieben.at>

<sup>2</sup>Institut für Angewandte Physik, TU Wien, Wiedner Hauptstraße 8-10, 1040 Wien

**Kurzfassung:** Die Europäische Union hat sich das Ziel gesetzt, ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber jenen aus dem Bezugsjahr 1990 bis zum Jahr 2020 um 20 %, bis 2030 um 30 % und bis 2050 um 85 % zu senken [1]. Das Gelingen dieser europäischen Energiewende hängt angesichts eines tendenziell steigenden Primärenergiebedarfs von der erfolgreichen Erschließung massiver Energiesparpotentialen ab.

Der Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen gehen in der Regel Energieanalysen voraus. Da die Energieflüsse in modernen Gebäuden aufgrund einer Vielzahl von haustechnischen Anlagen sehr komplex sind, ergibt sich für ExpertInnen die Herausforderung, mit vertretbarem Aufwand solide Ergebnisse abzuleiten. Andererseits ist die tatsächliche Umsetzung vorgeschlagener Maßnahmen in hohem Maße von der Nachvollziehbarkeit der Bewertung der möglichen Energieeinsparung abhängig, da Gebäudebetreiber auf eine vertrauenswürdige Entscheidungsgrundlage angewiesen sind. Unsichere Größen, wie beispielsweise das Nutzerverhalten, können einen großen Einfluss auf den berechneten Einsparerfolg einer Energieeffizienzmaßnahme haben (etwa durch rebound-Effekte).

Die hier vorgestellte Methode versucht diesen Unsicherheiten Rechnung zu tragen und Analyseergebnisse zu liefern, welche eine bessere Einschätzung des zu erwartenden Einspareffekts liefern als gängige Einzahlwerte.

**Keywords:** Energieeffizienz, Energieeinsparberechnung, Monte-Carlo-Simulation, Gebäude, Unsicherheit

## 1 Hintergrund und Motivation

Der weltweite Energiebedarf weist seit Jahrzehnten eine steigende Tendenz auf und ist in der Vergangenheit insbesondere durch fossile Energieträger gedeckt worden. Dies hat dazu geführt, dass die Menschheit vor „beispiellosen Herausforderungen, die auf verstärkte Abhängigkeit von Energieimporten, knappe Energieressourcen sowie [der] Erfordernis, dem Klimawandel Einhalt zu gebieten“ [1] (S.1) steht.

Das beschränkte und geografisch ungleich verteilte Vorkommen von Energieressourcen führt einerseits zu politischen Abhängigkeiten, andererseits gehen damit auch starke

Preisschwankungen von Energieträgern einher, was einen beträchtlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit ganzer Gewerbezweige haben kann.

Darüber hinaus sind der Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen und damit die Bedrohung durch den weltweit beobachtbaren Klimawandel mit der Verbrennung von fossilen Energieträgern direkt verknüpft. Im Rahmen der UN-Klimakonferenz im Dezember 2015 in Paris wurde daher vereinbart, das Ziel zu verfolgen, den Klimawandel auf einen Anstieg der Durchschnittstemperatur unter 2 °C zu beschränken.

Die Reduktion der Abhängigkeit von nicht nachwachsenden und zu importierenden Energieträgern und das Erreichen der europäischen und internationalen Klimaschutzziele erfordert zwingendermaßen eine Erhöhung der Energieeffizienz. Die Anforderung, den unnützen Energieeinsatz zu minimieren, stellt sich sowohl an die Prozesse der Energieumwandlung von Primärenergie zu Nutzenergie, als auch an sämtliche energieverbrauchenden Sektoren wie Gewerbe, Industrie, Mobilität und Gebäude.

Durch die Verabschiedung der Richtlinie 2012/27/EU des Europäischen Parlaments und des Rates hat die Europäische Union das Themenfeld Energieeffizienz „in den Mittelpunkt der Energiestrategie der Union bis 2020 gestellt“ [1]. Diese wurde in Österreich durch das Bundes-Energieeffizienz (EEffG) ratifiziert, sodass sich für den heimischen Energiemarkt konkrete legislative Anforderungen ergeben haben.

Aus konkreten Forschungsprojekten und Erfahrungsberichten (vgl. beispielsweise [2]) ist bekannt, dass der Gebäudesektor ein großes Potential zur Steigerung seiner Energieeffizienz aufweist. Dies wird auch im Rahmen der Richtlinie 2012/27/EU angemerkt, wo der Gebäudebestand als „Einzelsektor mit dem größten Energieeinsparpotenzial“ [1] bezeichnet wird.

Um nun Energieeffizienzmaßnahmen für konkrete Gebäude ableiten und deren energetischen und ökonomischen Einspareffekt möglichst realitätsnah abbilden zu können, ist eine entsprechende Bewertungsmethode gefordert. Das EEffG stellt dafür eine vereinfachte, pauschalisierte Methodik für ausgewählte Maßnahmen zur Verfügung (siehe [3]), welche einen geringen Aufwand im Rahmen von Energieanalysen erfordert, in der Regel allerdings wenig robuste Aussagen über erzielbare Einsparungen zur Folge hat.

Besonders für langfristige Investitionsentscheidungen sind jedoch eine Risikobetrachtung und die Angabe einer Schwankungsbreite des Einspareffekts von Bedeutung. Dadurch kann auch das finanzielle Investitionsrisiko besser beurteilt werden und eine konzentrierte Umsetzung jener Maßnahmen erfolgen, deren Effekt den individuellen Anforderungen der Gebäudebetreiber am besten genügt. Darüber hinaus ist die erzielbare Energieeinsparung oftmals von Faktoren abhängig, die mit einer Unsicherheit behaftet oder nur schwer einzuschätzen sind. Dies macht sich in der Praxis beispielsweise in Form so genannter rebound-Effekte bemerkbar, durch welche die Wirkung von Maßnahmen durch geändertes Verhalten der Gebäudenutzer deutlich reduziert wird.

## **2 Methodik**

Die hier vorgestellte Methode zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen stützt sich auf die Vorgaben der ÖNORM EN 16212 „Energieeffizienz und -einsparberechnungen – Top-Down- und Bottom-Up-Methoden“ (vgl. [4]). Zur Berücksichtigung unsicherer Einflussgrößen

wird stets zwischen konstanten und unsicheren Einflussparametern des Bewertungsmodells unterschieden. Im Folgenden werden die beiden Modellschritte, nämlich die Definition der Bezugssituation und die Modellierung des Einspareffekts, erläutert.

## 2.1 Erstellung und Normalisierung der Baseline

Zu Beginn der Bewertung einer Maßnahme ist die aktuelle Energieverbrauchssituation zu analysieren. Jener Verbrauch, welcher ohne eine Änderung von Systemparametern zu erwarten ist, wird als Baselineverbrauch bezeichnet und kann aus dem vorhandenen Datenbestand eruiert werden.

Hier besteht die Möglichkeit, dass (beispielsweise durch Vorhandensein eines Energieverbrauchsmonitoringsystems) ein detaillierter Datensatz der Nachfragestruktur einzelner Gebäudeenergieverbraucher vorhanden ist. In diesem Fall kann unter Umständen jedem Gewerk (Beleuchtung, Lüftung, etc.) respektive jeder einzelnen Haustechnikanlage ein gemessener Energieverbrauch zugeordnet werden. Für den Fall, dass das Gebäude einen Jahresenergieverbrauch von mehr als 100 MWh aufweist, kann vom Energieversorger ein Lastprofil auf Viertelstunden- oder Stundenebene bezogen werden. Aus diesem können ebenso Aussagen über den Baselineverbrauch getroffen werden.

Die andere Situation ist diejenige, wo für die Gebäudeanalyse nur wenige Verbrauchsdaten zur Verfügung stehen, wie dies beispielsweise typischerweise für Einfamilienhäuser mit einer Jahresablesung der Energiezähler der Fall ist.

Der Energieverbrauch eines Gebäudes ist in der Regel von einer Reihe von Einflussgrößen abhängig, welche im Vorfeld einer Energieanalyse zu eruierten sind. In Abhängigkeit der Datendichte gibt es zwei Möglichkeiten, wie die gewählte Baseline normalisiert werden kann:

- Für den Fall geringer Datenbestände (Monats- oder Jahresverbrauchswerte) wird zu einer Normierung über einen Anpassungsfaktor geraten. Dies sei an dieser Stelle für Heizenergieverbrauchsdaten, welche in natürlicher Weise vom Temperaturprofil des betrachteten Jahres abhängen, unter Verwendung der Heizgradtageszahl veranschaulicht. Hierbei wird das Verhältnis der Heizgradtageszahl des 30-jährigen Mittels zu jener des betrachteten Jahres gebildet. Durch diese Normalisierung sind auch unterschiedliche Jahresverbrauchsdaten miteinander vergleichbar. All jene Größen in Formel (1.1), welche mit einer Tilde gekennzeichnet sind, sind hierbei unsichere Einflussparameter und können durch eine geeignet gewählte statistische Verteilung beschrieben werden.

$$\tilde{Q}_{Norm} = \tilde{Q}_{Heiz} \cdot \frac{\overline{HGT}_{[TRY]}}{\overline{HGT}_{[0]}} + \tilde{Q}_{WW} \quad (1.1)$$

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| $\tilde{Q}_{Norm}$ .....       | Temperaturbereinigter Wärmeverbrauch [kWh]                                     |
| $\tilde{Q}_{Heiz}$ .....       | Gemessener Heizwärmeverbrauch [kWh]  |
| $\overline{HGT}_{[TRY]}$ ..... | Heizgradtageszahl [20/12] des Testreferenzjahres [Tage]                        |
| $\overline{HGT}_{[0]}$ .....   | Heizgradtageszahl [20/12] des zum gemessenen Verbrauch gehörigen Jahres [Tage] |
| $\tilde{Q}_{WW}$ .....         | Gemessener Wärmeverbrauch zur Warmwasserbereitstellung [kWh]                   |

Hängt der Energieverbrauch von anderen Parametern ab, so kann das Verfahren entsprechend adaptiert werden, indem der aktuelle Parameterwert zu seinem langfristigen Mittel in Beziehung gesetzt wird. Für ein Krankenhaus kann dies beispielsweise das Verhältnis des Mittelwerts der Anzahl ambulant behandelter Patienten der letzten Dekade zum entsprechenden Wert des Bezugsjahres sein, wenn diese Größe den Energieverbrauch merklich beeinflusst.

- Sind detaillierte Energieverbrauchsdaten (beispielsweise auf Tagesebene) vorhanden, so kann mittels Maximum-Likelihood-Methode oder der Methode der kleinsten Quadrate ein (generalisiertes) lineares Modell ermittelt werden, um den zu erwartenden Energieverbrauch in Abhängigkeit seiner Einflussvariablen beschreiben zu können. Nach der Identifikation möglicher Einflussgrößen auf den Tagesenergieverbrauch, wird mit Hilfe schrittweiser Modellselektion ein finales Approximationsmodell mit den relevanten Einflussgrößen abgeleitet. Somit können natürliche Schwankungen im Energieverbrauch, welche nicht durch Energieeffizienzmaßnahmen bedingt sind, berücksichtigt bzw. modelliert werden. Dabei kann derart vorgegangen werden, dass alle möglichen Modellparameter, zu welchen Werte vorliegen, mittels (multipler) linearer Regression für die Modellbildung herangezogen werden. Die Auswahl des finalen Modells wird mit Hilfe des Akaike Informationskriterium bestimmt, wobei jenes Modell mit dem kleinsten AIC bevorzugt wird.

Abbildung 1 zeigt dies exemplarisch für ein Gebäude, dessen Tagesenergieverbrauch für die Werktage Montag bis Donnerstag vom Parameter Außentemperatur abhängig ist. Es besteht also eine Abhängigkeit des Energieverbrauchs von zwei Variablen. Die Schwankungsbreite der Residuen kann dabei durch ein geeignetes Konfidenzintervall des Modells berücksichtigt werden.

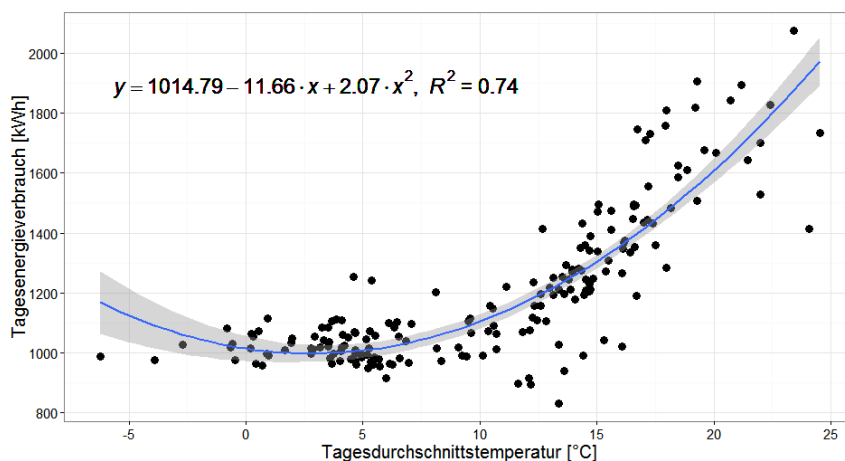


Abbildung 1: Approximationsmodell der Temperaturabhängigkeit des Energieverbrauchs an Werktagen (Montag bis Donnerstag) von der Außentemperatur für ein Beispielgebäude in Wien

Um nun diese Unsicherheit der prognostizierten Einspareffekte, welche durch Schwankungen in den identifizierten Einflussgrößen hervorgerufen werden, beurteilen zu können, wird für jene Kalendertage des Baselinejahres (i.e. den Bezugsenergieverbrauch),

deren Energieverbräuche eine Abhängigkeit von einem der erkannten Parameter aufweisen, eine Monte-Carlo-Simulation durchgeführt.

Aus der Klimanormalperiode des Gebäudestandorts ist die Verteilung der Tagesdurchschnittstemperatur der vergangenen 30 Jahre bekannt. Mit deren Hilfe kann nun unter Verwendung des aufgestellten Approximationsmodells mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation (10.000 Iterationen) eine Verteilung des Tagesenergieverbrauchs für jeden einzelnen Tag gesampelt werden. Aus dieser Verteilung lässt sich nun eine Abschätzung der Unsicherheit von Energieeffizienzmaßnahmen ableiten, indem unter Verwendung geeigneter Grenzen (z. B. Minimum und Maximum bzw. 5 %- und 95 %-Quantil des Samples) Intervalle für die natürliche Schwankungsbreite des Energieverbrauchs zur Verfügung stehen.

Für jede vorgeschlagene Energieeffizienzmaßnahme steht nun als Baseline-Verbrauchsgröße ein Intervall zur Verfügung, in welchem der Energieverbrauch jedes Kalendertages erwartungsgemäß liegt.

Für das gezeigte Beispielgebäude ist also bei der Beurteilung des Einspareffekts zu berücksichtigen, ob im Betrachtungszeitraum überwiegend wärmere oder kältere Tage auftreten. Wird beispielsweise eine Maßnahme angedacht, welche den Energiebedarf bei hohen Temperaturen reduziert, so hat das auftretende Temperaturprofil im Betrachtungszeitraum einen entscheidenden Einfluss auf die Amortisationszeit. Die Transformation hinsichtlich eines Testreferenzjahres zum Gebäudestandort hat daher für eine unabhängige Maßnahmenbewertung einen hohen Stellenwert.

## **2.2 Simulation des Maßnahmeneffekts**

Zu jeder Maßnahme werden mathematische Modelle angenommen, welche den zu erwartenden Einspareffekt geeignet abbilden. Dabei wird zwischen Eingabeparametern unterschieden, die einen bekannten, festen Wert annehmen (beispielsweise der Anzahl von Lichtpunkten in einem Büroraum), und variablen Größen, die mit einer gewissen Unsicherheit behaftet sind (z. B. die Brenndauer der Leuchtmittel). An die unsicheren Eingabeparameter werden nun passende statistische Verteilungen angepasst. Hierfür wird bevorzugterweise auf bekannte Datensätze (z. B. auf die Bürozeiten von MitarbeiterInnen) zurückgegriffen, in Einzelfällen wird auf ExpertInneneinschätzungen verwiesen. Die Berechnung des Einspareffekts einer Energieeffizienzmaßnahme kann dadurch erneut auf eine Monte-Carlo-Simulation gestützt werden, nachdem die Unsicherheiten der Modellparameter mit Hilfe der gefitteten statistischen Verteilungen berücksichtigt werden können. Als finales Ergebnis der Bewertung erhält man damit statt eines einzelnen statischen Lageparameters ein Intervall, in welchem der zu erwartende Einspareffekt mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit liegt. Dadurch sind robustere Aussagen möglich, als dies die Angabe eines reinen skalaren Ergebnisses erlaubt.

Es kann oftmals notwendig sein, dass der Baselineverbrauch für eine Maßnahme ebenfalls simuliert wird, wenn beispielsweise nur Energieverbrauchsdaten für das gesamte Gebäude vorliegen, nicht aber für das von der Maßnahme betroffene Gewerk. Im folgenden Abschnitt werden einige Simulationsmodelle für exemplarische Energieeffizienzmaßnahmen vorgestellt.

### 3 Simulationsmodelle zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen

#### 3.1 Raumluftechnische Anlagen

Raumluftechnische Anlagen sorgen in vielen Dienstleistungsgebäuden für den notwendigen hygienischen Luftwechsel und für einen entsprechenden Wohnkomfort. Je nach Anlagenausstattung kann mit ihrer Hilfe die einströmende Luft auch konditioniert, das heißt hinsichtlich gewünschter Behaglichkeitskriterien verändert, werden. Dadurch ergeben sich auch weitreichende Wechselwirkungen von Effizienzmaßnahmen, nachdem beispielweise die Optimierung der Betriebszeit nicht nur elektrische Energie durch eine Reduktion der Ventilatorlaufzeit einspart, sondern auch die Betriebszeit von Heiz- und Kühlregistern, sowie von Be- und Entfeuchtungsanlagen reduziert wird.

Der Energiebedarf von raumluftechnischen Anlagen setzt sich allgemein aus der Betriebszeit, dem in der Anlage auftretenden Druckverlust, dem gewünschten Luftvolumenstrom und dem Wirkungsgrad des Ventilators, sowie den Konditionierungsanforderungen zusammen. Mögliche Energieeffizienzmaßnahmen zu einer bestehenden Anlage können also daraus bestehen, dass ein oder mehrere dieser Parameter optimiert werden, wie etwa:

- Tausch der Antriebseinheit oder des Ventilators zur Reduktion der elektrischen Leistungsaufnahme;
- Installation oder Verbesserung einer Wärmerückgewinnungseinheit zur Reduktion des Heiz- bzw. Kühlbedarfs des Volumenstroms;
- Optimierung der Betriebsparameter an den tatsächlichen Bedarf (Betriebszeit und Betriebsstufen, gewünschte Raumtemperatur, Intervall für zulässige relative Raumfeuchte);
- Optimieren des Volumenstroms zur Reduktion der vom Ventilatorsystem zu erbringenden elektrischen Leistung.

Eine Einsparung des elektrischen Energieverbrauchs durch eine Reduktion der Betriebszeit oder eine Anpassung der Ventilatorleistung lässt sich nach Formel (3.1) berechnen.

$$\Delta E = (\Delta P_{zu} + \Delta P_{ab}) \cdot \Delta t_{op} \quad (3.1)$$

$\Delta E$ .....Reduktion des elektrischen Energieverbrauchs [kWh]

$\Delta P_{zu}$ .....Reduktion der elektrischen Ventilatorleistung des Zulufstroms [kW]

$\Delta P_{ab}$ .....Reduktion der elektrischen Ventilatorleistung des Abluftstroms [kW]

$\Delta t_{op}$ .....Reduktion der Betriebszeit der Lüftungsanlage [h]

Beeinflusst eine Maßnahme (beispielsweise die Optimierung der Anlagenlaufzeit) auch den Energieaufwand für die Heizung oder Kühlung des Volumenstroms, so erhält man zusätzlich eine Energieeinsparung durch Veränderung des erforderlichen Wärmestroms nach Formel (3.2) (vgl. (5), S.22). Dieser muss in der Heizsaison zugeführt, in der Kühlsaison abgeführt

werden. Es ist dabei auf mögliche Wechselwirkungen mit vorhandenen Heizungsanlagen und Kältemaschinen zu achten und der entsprechende Effekt in die Maßnahmenbewertung zu berücksichtigen.

$$Q_V = V_L \cdot \rho_L \cdot c_{p,L} \cdot (T_R - T_A) \quad (3.2)$$

$Q_V$ .....zuzuführender Wärmestrom im Falle von Heizung bzw. abzuführender Wärmestrom im Falle von Kühlung [W]

$V_L$ .....Luftvolumenstrom [ $m^3/s$ ]

$\rho_L$ .....Dichte, Luft [ $kg/m^3$ ]

$c_{p,L}$ .....Spezifische Wärmekapazität, Luft [ $kJ/(kg.K)$ ]

$T_R$ .....Temperatur der abgesaugten Raumluft [K]

$T_A$ .....Temperatur der angesaugten Außenluft [K]

Für die Ersparnis der Energiemenge, welche zur Be- oder Entfeuchtung notwendig ist, sind anhand der gewünschten maximalen respektive minimalen relativen Feuchte die absoluten Feuchtwerte aus einem Mollier-Diagramm zu ermitteln. Aus dem Feuchteprofil des Testreferenzjahres für den Gebäudestandort kann damit jeweils der Energieaufwand erhoben werden, welcher zur Bereitstellung beziehungsweise Kondensation der erforderlichen Wasserdampfmenge aufgebracht werden muss.

Das Simulationsmodell baut nun auf ein Profil aus Temperaturstundenwerten der Klimanormalperiode des Gebäudestandorts auf, wobei zu jeder Stunde eines Jahres der aktuell auftretende elektrische Energiebedarf und, bei Vorhandensein der entsprechenden Anlagenkomponenten, der Heiz-, Kühl-, Be- und Entfeuchtungsbedarf ermittelt wird. Sofern ein konkreter, hinsichtlich externer Einflussgrößen normierbarer Baselineverbrauch zur behandelten Anlage bekannt ist, kann dieser Schritt entfallen. In einem zweiten Schritt werden nun all jene Modellparameter adaptiert, welche von der bewerteten Energieeffizienzmaßnahme betroffen sind und die Simulation wiederholt. Der Vergleich der beiden normierten Verbrauchswerte liefert den zu erwartenden Einspareffekt.

Für die Berücksichtigung der Unsicherheit der nicht festen Modellparameter wird diesen eine statistische Verteilung zugewiesen. Für die Stundenwerte des Testreferenzjahres kann dies beispielsweise eine Normalverteilung sein, wenn zu den Mittelwerten auch die entsprechenden Standardabweichungen respektive Konfidenzintervalle bekannt sind.

Abbildung 2 zeigt das erhaltene Sample einer Monte-Carlo-Simulation von 1.000 Iterationen für eine Lüftungsanlage, deren Betrieb an den tatsächlichen Bedarf angepasst worden ist. Nachdem das hinterlegte Feuchteprofil im 30-jährigen Mittel nur geringe Schwankungen für den Gebäudestandort aufweist, ist die relative Abweichung der Energieeinsparung vergleichsweise gering. Tabelle 1 weist die entsprechenden Quantilswerte des Samples aus.

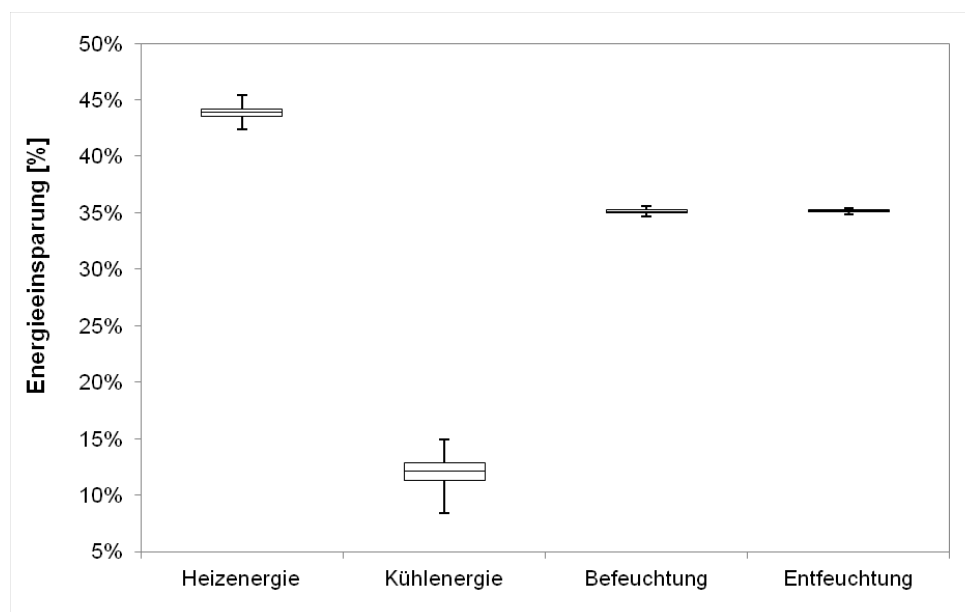


Abbildung 2: Simulationsergebnis des Einspareffekts durch Betriebsoptimierung einer Lüftungsanlage

Tabelle 1: Quantile des Simulationsergebnisses aus Abbildung 2

|              | Minimum | Quantil 1 | Mittelwert | Median | Quantil 3 | Maximum |
|--------------|---------|-----------|------------|--------|-----------|---------|
| Heizenergie  | 42,4%   | 43,5%     | 43,9%      | 43,9%  | 44,2%     | 45,4%   |
| Kühlenergie  | 8,4%    | 11,3%     | 12,1%      | 12,1%  | 12,8%     | 14,9%   |
| Befeuchtung  | 34,6%   | 35,0%     | 35,1%      | 35,1%  | 35,2%     | 35,6%   |
| Entfeuchtung | 34,9%   | 35,1%     | 35,2%      | 35,1%  | 35,2%     | 35,4%   |

### 3.2 Heizungs- und Klimaanlage

Systeme zur Konditionierung von Gebäuden beanspruchen in der Regel einen großen Anteil des Gesamtenergiebedarfs eines Gebäudes. Mögliche Effizienzmaßnahmen reichen vom Optimieren ihrer Betriebsparameter über den Tausch einzelner Komponenten bis hin zum Ersatz des Gesamtsystems.

Anlagenkurven von Heizungs- und Kälteanlagen sind oftmals derart gewählt, dass der tatsächliche Bedarf überschätzt wird oder beispielsweise durch Zuziehen von Free-Cooling über Nachtlüftungen ein hohes Einsparpotential erschlossen werden kann. Nachdem der jeweils erzielbare Einspareffekt vom tatsächlich auftretenden Temperaturprofil im Betrachtungszeitraum abhängt, ist dieser mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Ein geeignetes Werkzeug zur Berechnung des normierten Energieeinspareffekts stellen die Heizgrad- beziehungsweise Kühlgradtage dar. Mit Hilfe eines Stundentemperaturprofils der Klimanormalperiode eines Gebäudestandorts können diese ebenso auf Stundenebene berechnet werden. Unter Verwendung von Formel (3.3) kann der Effekt der



Betriebsoptimierung einer Heizungsanlage berechnet werden, wobei der Anteil zur Warmwasserbereitstellung zu berücksichtigen ist.

$$\tilde{Q}_{Norm}^M = (\tilde{Q}_{Norm} - \tilde{Q}_{WW}) \cdot \frac{\overline{HGT}_{[TRY]}^M}{\overline{HGT}_{[TRY]}^0} \quad (3.3)$$

$\tilde{Q}_{Norm}^M$  ..... Temperaturbereinigter Wärmeverbrauch nach  
Maßnahmenumsetzung [kWh]

$\overline{HGT}_{[TRY]}^M$  ..... Heizgradtageszahl bezüglich der Betriebsparameter für das  
Testreferenzjahres nach Maßnahmenumsetzung [K]

$\overline{HGT}_{[TRY]}^0$  ..... Heizgradtageszahl bezüglich der Betriebsparametern für das  
Testreferenzjahres vor Maßnahmenumsetzung [K]

$\tilde{Q}_{Norm}$  ..... Temperaturbereinigter Wärmeverbrauch [kWh]

$\tilde{Q}_{WW}$  ..... Gemessener Wärmeverbrauch zur Warmwasserbereitstellung [kWh]

Abbildung 3 zeigt das mittels Monte-Carlo-Simulation (1.000 Iterationen) gewonnene Sample des normierten Baseline- und Referenzverbrauchs nach Maßnahmenumsetzung, sowie die zugehörige Unsicherheit des Einspareffekts.

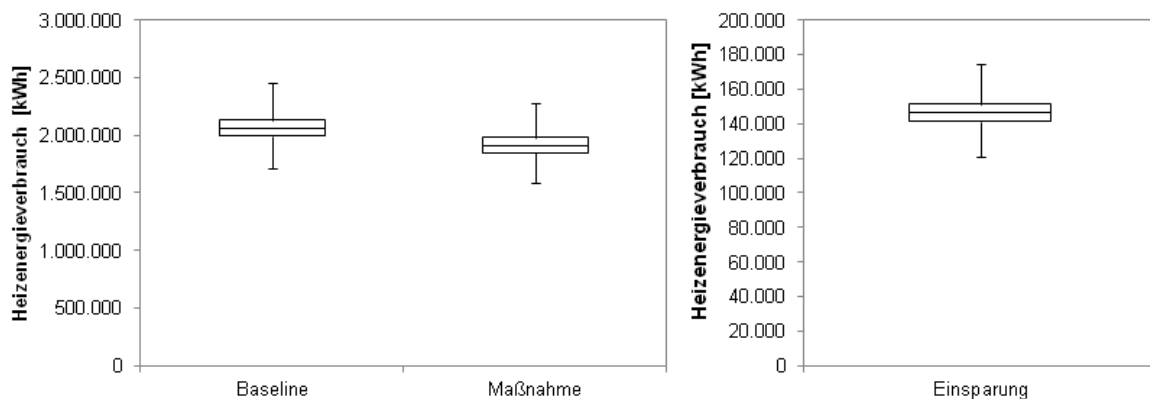


Abbildung 3: Simulationsergebnis des Einspareffekts durch Betriebsoptimierung einer Heizungsanlage

Analog zur Berechnung der Betriebszeitenreduktion von Heizungsanlagen kann diese bei Kälteanlagen über das Verhältnis der Kühlgradtageszahlen vor und nach Maßnahmenumsetzung, jeweils bezogen auf die Klimanormalperiode des Standorts, berechnet werden (nach Formel (3.4)). Das entsprechende Simulationsergebnis ist in Abbildung 4 dargestellt.

$$\tilde{C}_{Norm}^M = \tilde{C}_{Norm} \cdot \frac{\overline{KGT}_{[TRY]}^M}{\overline{KGT}_{[TRY]}^0} \quad (3.4)$$

- $\tilde{C}_{Norm}^M$  ..... Temperaturbereinigter elektrischer Energieverbrauch zur Kältebereitstellung nach Maßnahmenumsetzung [kWh]
- $\overline{KGT}_{[TRY]}^M$  ..... Betrag der Kühlgradtageszahl bezüglich der Betriebsparameter für das Testreferenzjahres nach Maßnahmenumsetzung [K]
- $\overline{KGT}_{[TRY]}^0$  ..... Betrag der Kühlgradtageszahl bezüglich der Betriebsparametern für das Testreferenzjahres vor Maßnahmenumsetzung [K]
- $\tilde{C}_{Norm}$  ..... Temperaturbereinigter elektrischer Energieverbrauch zur Kältebereitstellung vor Maßnahmenumsetzung [kWh]

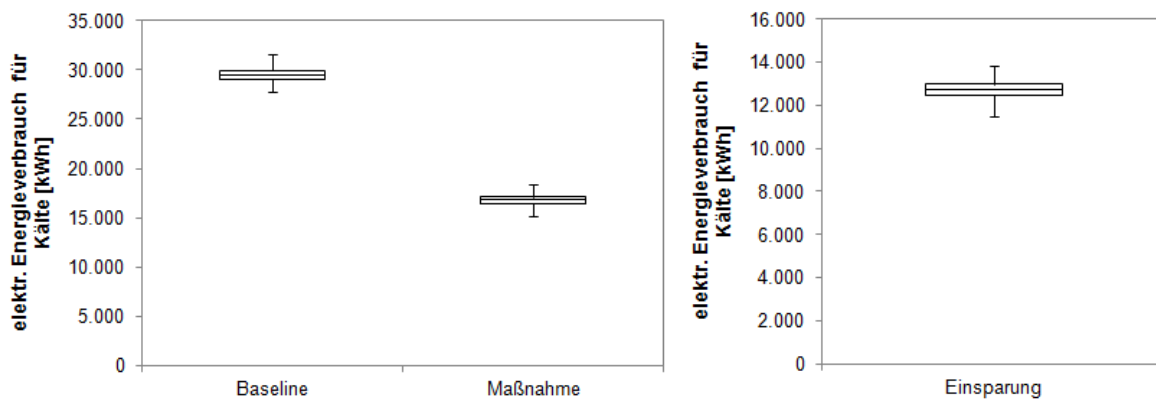


Abbildung 4: Simulationsergebnis des Einspareffekts durch Betriebsoptimierung einer Kälteanlage

### 3.3 Beleuchtung

Maßnahmen zur Effizienzsteigerung von Beleuchtungsanlagen können im Wesentlichen über eine Reduktion der elektrischen Anschlussleistung von Lichtpunkten, respektive deren Brenndauer bewertet werden. Je nach Regelungsart des Systems handelt es sich bei den beiden Parametern um feste oder variable Werte. Eine tageslichtabhängige Beleuchtungsstärke führt zu einer Unsicherheit beider Parameter, während manuelle Regelung bei nicht-dimmbaren Leuchtkörpern nur die Brenndauer mit einer Schwankungsbreite behaftet.

Je nach konkreter Maßnahmen-situation werden den unsicheren Parametern entsprechende statistische Verteilungen zugeordnet. Abbildung 5 zeigt das Sample aus einer Monte-Carlo-Simulation von 1.000 Ziehungsvorgängen zur Bewertung des Tauschs der Beleuchtung in einem täglich genutzten Veranstaltungssaal. Während zuvor Leuchtstoffröhren mittels manueller Regelung in Verwendung waren, sieht die Maßnahme einen Tausch auf LED-Elemente mit tageslichtabhängiger Leuchtstärke vor. Die Beleuchtungsdauer wird hierbei in Abhängigkeit der Globalstrahlung des Gebäudestandorts aus einer Gleichverteilung gezogen, die von dieser abhängigen Leistungsaufnahme der LED-Elemente folgt gemäß der Anlagenauslegung einer Normalverteilung.

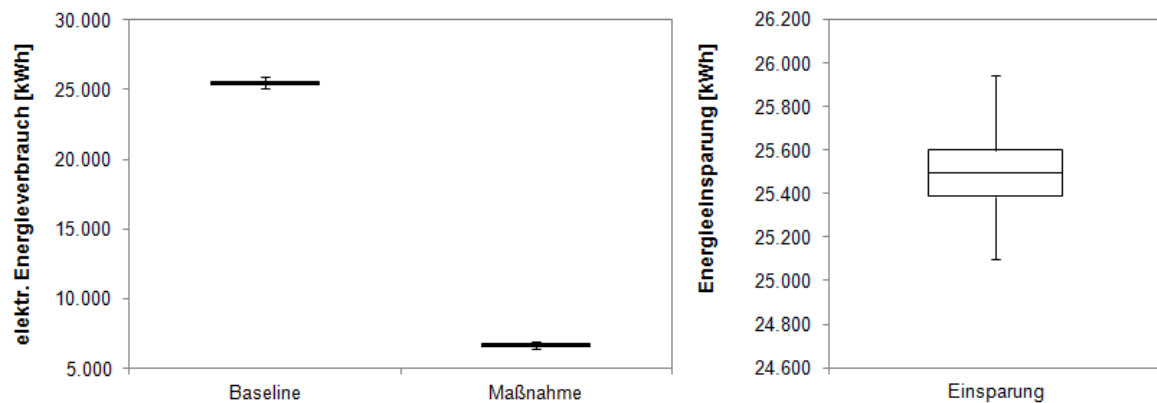


Abbildung 5: Simulationsergebnis des Einspareffekts durch Optimierung des Beleuchtungssystems

## 4 Ergebnisse und Resümee

In diesem Paper wurde eine konzeptuelle Methode vorgestellt, welche für die Berücksichtigung unsicherer Einflussgrößen bei der Analyse des Energieeinsparpotentials herangezogen werden kann. Darüber hinaus konnte anhand der beispielhaft durchgeführten Simulationen gezeigt werden, dass in der Betriebsoptimierung von haustechnischen Anlagen großes Potential zur Steigerung der Energieeffizienz zu erschließen ist (vgl. Abbildungen 2 – 4).

Insbesondere im Fall von investiven Maßnahmen erlaubt die Schwankungsbreite des berechneten Einspareffekts die Angabe einer minimalen und maximalen Amortisationszeit, welche den GebäudebetreiberInnen als Entscheidungsgrundlage für die Umsetzung dient. Ohne spezielle Kenntnisse der komplexen Energieflüsse eines Gebäudes kann dadurch eine Investitionsentscheidung auf soliderer Grundlage getroffen werden, als dies eine Einzahlangabe darstellen würde.

Für organisatorische, nicht-investive Maßnahmen ist die Kosteneinsparung meist von der Motivation und Umsicht der GebäudenutzerInnen abhängig. Wenn diesen allerdings der Einfluss ihres Verhaltens auf den möglichen Rahmen der Einsparung dargestellt werden kann und dieser nicht als verhaltensunabhängiger Einzahlwert präsentiert wird, ist davon auszugehen, dass deren Motivation gesteigert wird und die Maßnahme eine höhere Erfolgsaussicht hat.

Die vorgestellte Methode erlaubt zudem die Bewertung des Energieeffizienzstandards des aktuellen Gebäudebetriebs. Das Analyseergebnis ermöglicht es, im Fall beschränkter Budgetmittel für Energieeffizienzmaßnahmen dieses möglichst effektiv einzusetzen. Darüber hinaus kann aus der Bandbreite der Berechnungsergebnisse und der statistischen Verteilung der unsicheren Einflussparameter unmittelbar abgeleitet werden, welche organisatorischen Schritte für das Gelingen einer Effizienzmaßnahme erforderlich sind.

## 5 Quellen

- [1] Europäische Kommission (2011): Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO<sub>2</sub>-armen Wirtschaft bis 2050; URL: [http://ec.europa.eu/archives/commission\\_2010-2014/hedegaard/headlines/topics/docs/com\\_2011\\_112\\_de.pdf](http://ec.europa.eu/archives/commission_2010-2014/hedegaard/headlines/topics/docs/com_2011_112_de.pdf); 26.11.2015
- [2] Rieger, U. Leutgöb, K. u.a. (2014): Re-Commissioning Services, Summary Final Evaluation Report URL: <http://re-co.eu/node/161>, 30.11.2015
- [3] Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft (2015): Anhang zum EEEffG, Verallgemeinerte Methoden zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen
- [4] Österreichisches Normungsinstitut, ÖNORM EN 16212 Energieeffizienz und -einsparberechnung — Top-Down- und Bottom-Up-Methoden. Wien, 2012.
- [5] M. Pehnt, Energieeffizienz. Ein Lehr- und Handbuch. Heidelberg, Springer Verlag, 2010.